

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR. ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

Untersuchung des Brandverhaltens von Bauteilen,
die mit Hochleistungs-Verbund-Elementen (HLV-Elementen)
bewehrt sind

Schlußbericht erstattet von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dr.-Ing. E. Richter

März 1988

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft HLV-Elemente STRABAG Bau- AG / BAYER AG, Köln, im Rahmen des BMFT-Förderungsvorhabens KT 7809 "Hochleistungs-Verbundelemente (HLV-Elemente): Entwicklung und Erprobung kunstharzgebundener Glasfaserbewehrung und ihrer Verankerung für die Aufnahme hoher Zugkräfte im Beton- und Erdbau", durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	4
1.1 Der Faserverbundwerkstoff des HLV-Stabes	4
1.2 Aufgabenstellung	9
2 Angaben über die Versuchskörper	9
2.1 Beschreibung der Versuchskörper	10
2.2 Baustoffkennwerte	14
2.3 Temperaturmeßquerschnitte	15
2.4 Verformungsmessungen	16
2.5 Sonstige Beobachtungen	17
3 Versuchsanordnung und -durchführung	18
3.1 Brandraum und Beheizung	18
3.2 Einbau, Vorspannung und Belastung der Versuchskörper	12
3.3 Bekleidung der Versuchskörper	22
3.4 Meßprogramm	23
4 Versuchsergebnisse	24
4.1 Brandraumtemperaturen	25
4.2 Druck im Brandraum	26
4.3 Verformungen der Versuchskörper	26
4.4 Temperaturen der schlaffen Bewehrung	26
4.5 Temperaturen am Hüllrohr der HLV-Elemente	26
4.6 Sonstige Beobachtungen	27
4.6.1 Versuchskörper HLV-1/86	27
4.6.2 Versuchskörper HLV-2/86	29
4.6.3 Versuchskörper HLV-3/86	29
4.7 Zusätzliche Untersuchungen	30
4.7.1 Tragfähigkeit nach dem Brandversuch	30
4.7.2 Spannglied nach dem Brandversuch	30

4.8 Auswertung der Versuchsergebnisse	32
4.8.1 Verformungen	32
4.8.2 Temperaturentwicklung	36
4.8.2.1 Schlaffe Bewehrung	36
4.8.2.2 HLV-Elemente	36
4.8.3 Versagen	41
4.9 Diskussion der Versuchsergebnisse	44
5 Beurteilung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis	46
6 Zusammenfassung	49
7 Literatur	50
Verzeichnis der Anlagen	52

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sind verschiedene Wege beschritten worden, um die Dauerhaftigkeit von Spannbetontragwerken zu verbessern. Dabei ist grundsätzlich zwischen den Bestrebungen zu unterscheiden, die auf eine Verbesserung des Korrosionsschutzes der Spannstahl-Spannglieder abzielen und solchen, die das Spannstahl-Spannglied durch Spannglieder aus neuartigen Werkstoffen ersetzen. Zur ersten Gruppe zählen die Ergänzung und Erweiterung des technischen Regelwerks (DIN 4227 Teil 2 und 6) sowie werkmäßig hergestellte, korrosionsgeschützte Spannglieder (Monolitzen) /1/. In der zweiten Gruppe wurden als Alternativen zum Spannstahl u.a. hochfeste Glasfaserverbundwerkstoffe untersucht.

Der Einsatz von hochfesten Glasfaserverbundwerkstoffen als Spannbewehrung in Betonbauteilen wird bereits seit Anfang der fünfziger Jahre diskutiert /2 - 5/. Die Ursache für die bis heute relativ geringe Nutzung des neuen Werkstoffs liegt darin, daß weder technisch ausgereiftes Stabmaterial noch baupraktisch einsetzbare Spannverfahren zur Verfügung standen. Die Firmen STRABAG-Bau AG und BAYER AG haben sich mit einem im Jahr 1978 begonnenen, vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben /6/ zum Ziel gesetzt, baupraktisch einsetzbare hochfeste Glasfaserverbundwerkstoffe einschließlich der zugehörigen Spannverfahren zu entwickeln.

1.1 Der Faserverbundwerkstoff des HLV-Stabes

Der im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens /6/ entwickelte hochwertige stabförmige Werkstoff wird von den beteiligten Firmen als Hochleistungs-Verbundwerkstoff HLV bezeichnet. Als Rohstoff für die Rundstäbe dienen Stränge aus jeweils 2.000 Glasfasern mit einem Faserdurchmesser von rd. 20 µm sowie flüssiges ungesättigtes Polyesterharz (UP-Harz). Ein Stab von 7,5 mm Durchmesser besteht z.B. aus etwa 60.000 Einzelfasern. Die Stränge werden im Tauchbad mit Harz getränkt, in einer Düse zusammengeführt und zum Rundstab geformt sowie unter Wärmezufuhr gehärtet. Der endlos gefertigte Stab wird aufgehaspelt in Ringen von 1,50 m Durchmesser gelagert und befördert.

Der Querschnitt eines HLV-Stabes enthält 70 Vol.-% Glasfasern und 30 Vol.-% Harz. Kennzeichnend für den HLV-Werkstoff sind die gleichmäßige unidirektionale Orientierung der Fasern und die weitgehend hohlraumfreie Kunstharzmatrix. Während für Festigkeit und Verformung in Stablängsrichtung die Fasern maßgebend sind, werden die Stabeigenschaften in Querrichtung im wesentlichen durch die Kunstharzmatrix bestimmt. Die Festigkeit in Längsrichtung, also in Richtung der Glasfasern, beträgt etwa das 10fache derjenigen in der Querrichtung. Im Bild 1.1 ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Verbundwerkstoffs sowie seiner Einzelkomponenten aufgetragen. Die Glasfasern weisen ein bis zum Bruch elastisches Verhalten auf, während der Kunstharz schon bei geringen Laststeigerungen eine deutlich überproportionale Zunahme der Verformungen aufweist.

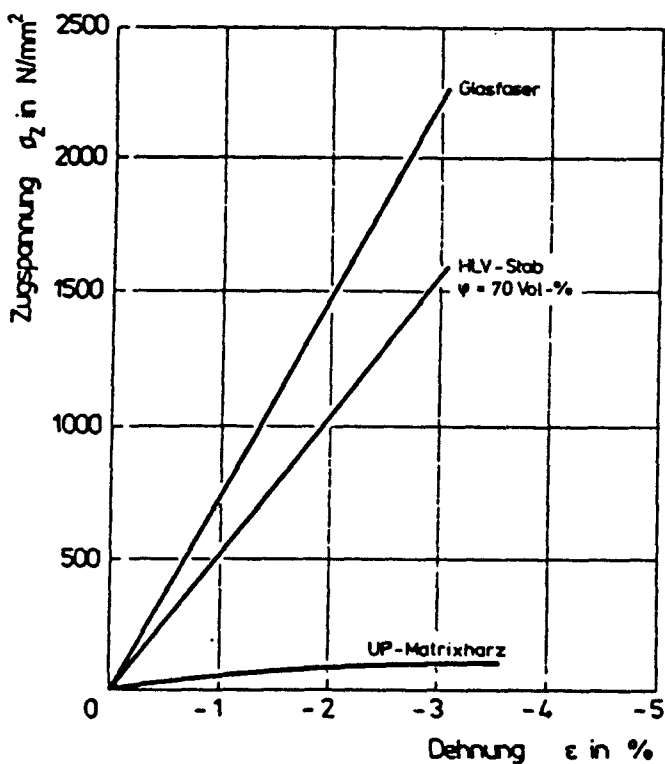


Bild 1.1: Spannungs-Dehnungslinie des HLV-Werkstoffs und seiner Komponenten bei Beanspruchung in Faserlängsrichtung (bei Raumtemperatur)

In Längsrichtung lassen sich für den HLV-Werkstoff der E-Modul und die Zugfestigkeit aus den bekannten mechanischen Eigenschaften der Glasfaser (G) und der Harzmatrix (H) nach folgenden additiven Beziehungen in Abhängigkeit vom Fasergehalt (Φ) ermitteln:

$$E_L = \Phi \cdot E_G + (1 - \Phi) \cdot E_H$$

$$\beta_{Lz} = \Phi \cdot \beta_G + (1 - \Phi) \cdot \beta_H$$

Für den HLV-Werkstoff lassen sich aufgrund des hohen Fasergehalts die Beziehungen vereinfachen, indem der durch das Harz gebildete geringe Anteil vernachlässigt wird. Damit kann von einem ideal-elastischen Verhalten des Verbundwerkstoffs bis zum Bruch ausgegangen werden /7/:

$$E_L \approx \Phi \cdot E_G$$

$$\beta_{Lz} \approx \Phi \cdot \beta_G$$

Eine Zusammenstellung der wichtigsten mechanischen Kenngrößen für den HLV-Werkstoff enthält Bild 1.2. Bei der Bewertung der angegebenen Festigkeitsangaben ist zu berücksichtigen, daß insbesondere die ermittelten Zugfestigkeiten von Faser und Stab entscheidend von der Versuchsdurchführung beeinflußt werden /7/.

Der HLV-Stab ist korrosionsbeständig, denn die an sich schon chemisch unempfindlichen Glasfasern werden durch ihre vollständige Umhüllung mit Kunstharz zusätzlich geschützt und können so auch die erforderliche Beständigkeit gegen alkalische Medien (z.B. Zement) erreichen, die das verwendete E-Glas (Aluminium-Bor-Silikat-Faserglas) selbst nicht hat. Während das Glas praktisch die gesamten Zugkräfte aufnimmt, hält das Harz die Fasern im Querschnitt zusammen und schützt sie gegen mechanische und chemische Schädigung. An den Stabenden wird die Schubfestigkeit des Harzes beansprucht, um die dort an der Staboberfläche angreifenden Zugkräfte in die einzelnen Fasern einzuleiten /8/.

Eigenschaften	Einheiten	Wert
<u>HLV-Werkstoff</u>		
Längszugfestigkeit (R)	N/mm ²	1.600
Querdruckfestigkeit (M)	N/mm ²	140
Schubfestigkeit (M)	N/mm ²	45
Elastizitätsmodul (R)	N/mm ²	52.000
Bruchdehnung (M)	°/°°	30
Querkontraktion (M)	-	0,28
Dichte (M)	kg/dm ³	2,1
<u>Glasfaser</u>		
Zugfestigkeit (M)	N/mm ²	≈ 2.300
Elastizitätsmodul (M)	N/mm ²	≈ 74.000
Bruchdehnung (M)	°/°°	30
<u>UP-Matrix</u>		
Zugfestigkeit (M)	N/mm ²	75
Elastizitätsmodul (M)	N/mm ²	300
Bruchdehnung (M)	°/°°	40

R : Rechenwert M : Meßwert

Bild 1.2: Mittlere Materialkennwerte des HLV-Stabes und seiner Komponenten
($\Phi = 70$ Vol.-%)

Im Bild 1.3 sind die σ - ϵ -Linie eines Spannstahls der Güte St 1470/1670 und eines HLV-Stabes gegenübergestellt. Beide Werkstoffe erreichen eine Zugfestigkeit von $\beta_z \approx 1600$ N/mm². Völlig unterschiedlich ist dagegen ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten: während der Spannstahl ein elastisch-plastisches Verhalten zeigt, bleibt der HLV-Werkstoff bis zum Bruch elastisch. Durch die sehr unterschiedlichen E-Moduli von Spannstahl und HLV-Werkstoff weichen die

Dehnungen der beiden Baustoffe bereits im Bereich der Gebrauchsspannungen deutlich von einander ab. Der HLV-Werkstoff erreicht annähernd die vierfache elastische Dehnung gegenüber dem Spannstahl. Die positive Konsequenz dieser großen Dehnung ist, daß Bauwerksverkürzungen aus Kriechen und Schwinden des Betons für die HLV-Spannbewehrung von untergeordneter Bedeutung sind. Gleichzeitig sind eventuelle nachteilige konstruktive Folgen, die sich aus den großen Spannweiten ergeben bzw. Auswirkungen hinsichtlich der Beurteilung der Bauwerkssicherheit infolge des fehlenden Fließvermögens der HLV-Werkstoffs zu beachten /7/.

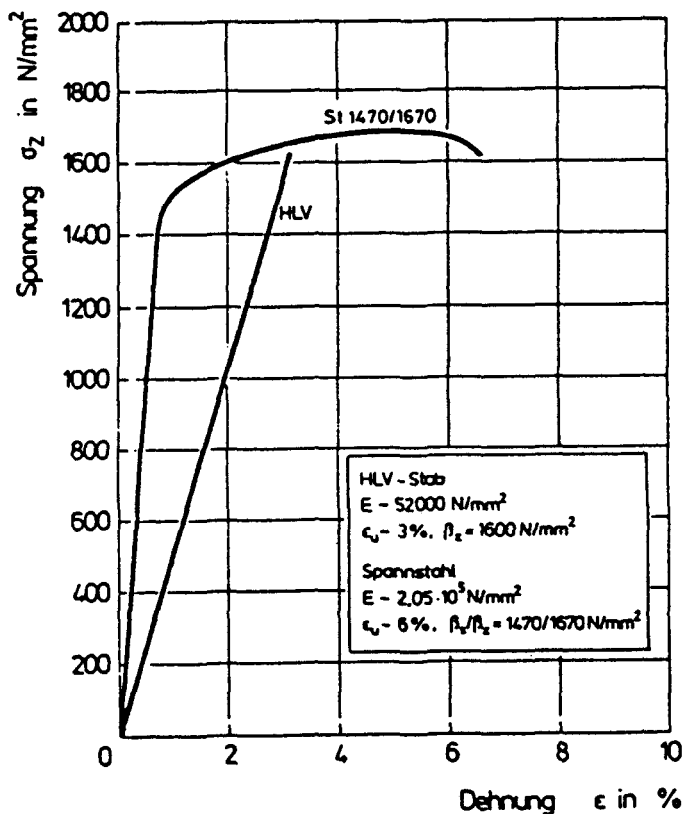


Bild 1.3: σ - ϵ -Linien von Spannstahl und HLV-Werkstoff

1.1 Aufgabenstellung

Die Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig wurde 1982 von der Arbeitsgemeinschaft HLV-Elemente, STABAG Bau AG / BAYER AG beauftragt, Untersuchungen über das Brandverhalten von Bauteilen, die mit Hochleistungs-Verbund-Elementen (HLV-Elementen) bewehrt sind, durchzuführen. Zunächst umfaßte das Versuchsprogramm Untersuchungen an Balken und Plattenstreifen, wobei für die Balken Vorspannung mit sofortigem Verbund (Spannbettvorspannung) und Vorspannung mit nachträglichem Verbund vorgesehen war, während die Plattenstreifen mit Vorspannung ohne Verbund hergestellt werden sollten. Infolge langfristig laufender Materialzusatzuntersuchungen, die von der Arbeitsgemeinschaft HLV-Elemente als notwendig erachtet und in Untersuchungen durchgeführt wurden, die nicht Inhalt dieses Erforschungsauftrages sind, mußte das ursprünglich aufgestellte Versuchsprogramm im Inhalt und Umfang geändert werden. Um möglichst rasch nach nach Beendigung der Materialuntersuchungen das Brandverhalten von Bauteilen mit vorgespannten HLV-Elementen untersuchen zu können, wurden als Versuchskörper drei Balken mit nachträglich vorgespannten HLV-Elementen hergestellt.

2 Angaben über die Versuchskörper

Für die Branduntersuchungen wurden drei Versuchskörper hergestellt. Die Versuchskörper unterschieden sich nur durch den verwendeten Auspreßmörtel der Spannkäule. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit erhielten die Brandversuche und die dabei eingesetzten Versuchskörper gleichlautende Abkürzungen. Im Bild 2.1 sind die Bezeichnungen der einzelnen Versuchskörper und die verwendeten Auspreßmörtel zusammengestellt.

Lfd. Nr.	Versuchskörper-Bezeichnung	Auspreßmörtel
1	HLV - 1/86	Reaktionsharzmörtel
2	HLV - 2/86	Reaktionsharzmörtel
3	HLV - 3/86	Zementmörtel

Bild 2.1: Bezeichnung der Versuchskörper und der zugehörigen Auspreßmörtel

2.1 Beschreibung der Versuchskörper

Die Versuchskörper waren 5,45 m lang, 25 cm breit und 50 cm hoch. An beiden Enden war die Höhe der Versuchskörper auf 65 cm vergrößert, dieser Bereich war jeweils 50 cm lang und wurde durch eine 45°-Voute auf das Regelmaß 50 cm überführt. Im Bild 2.2 sind die Abmessungen der Versuchskörper dargestellt.

Seitenansicht

Schnitt A-A

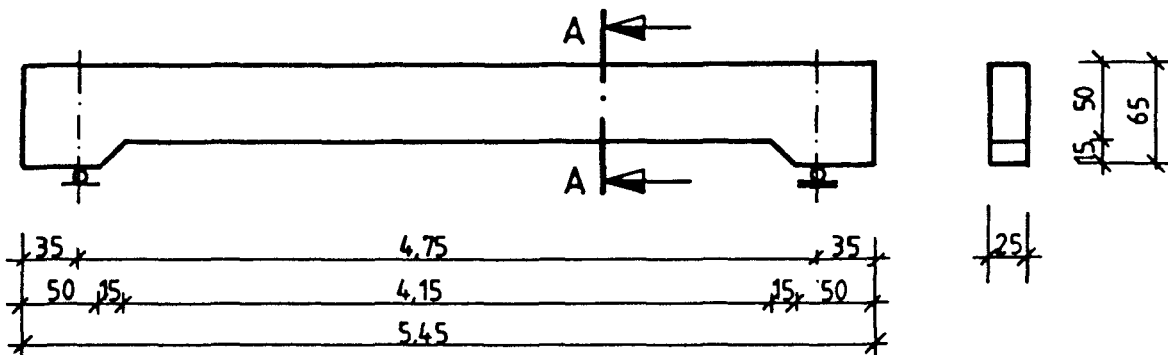


Bild 2.2: Abmessungen der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden jeweils mit einem Spannglied vorgespannt, das aus acht radialsymmetrisch angeordneten HLV-Elementen $\varnothing 7,5$ mm bestand. Bild 2.3 zeigt die radialsymmetrische Anordnung der HLV-Elemente im Bereich der Verankerung.

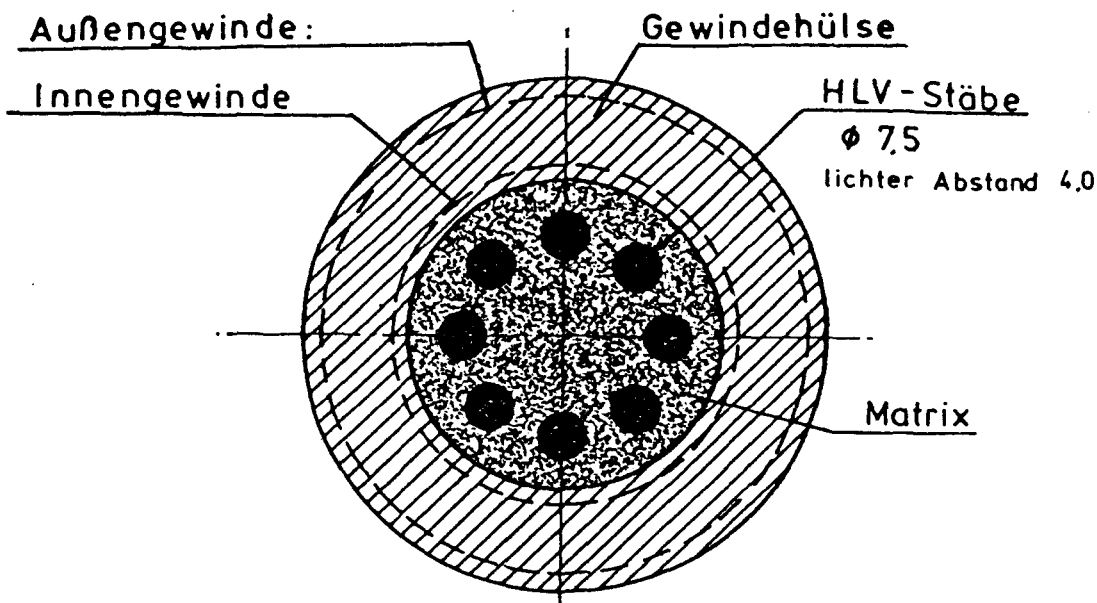


Bild 2.3: Radialsymmetrische Anordnung der HLV-Elemente im Bereich der Verankerung

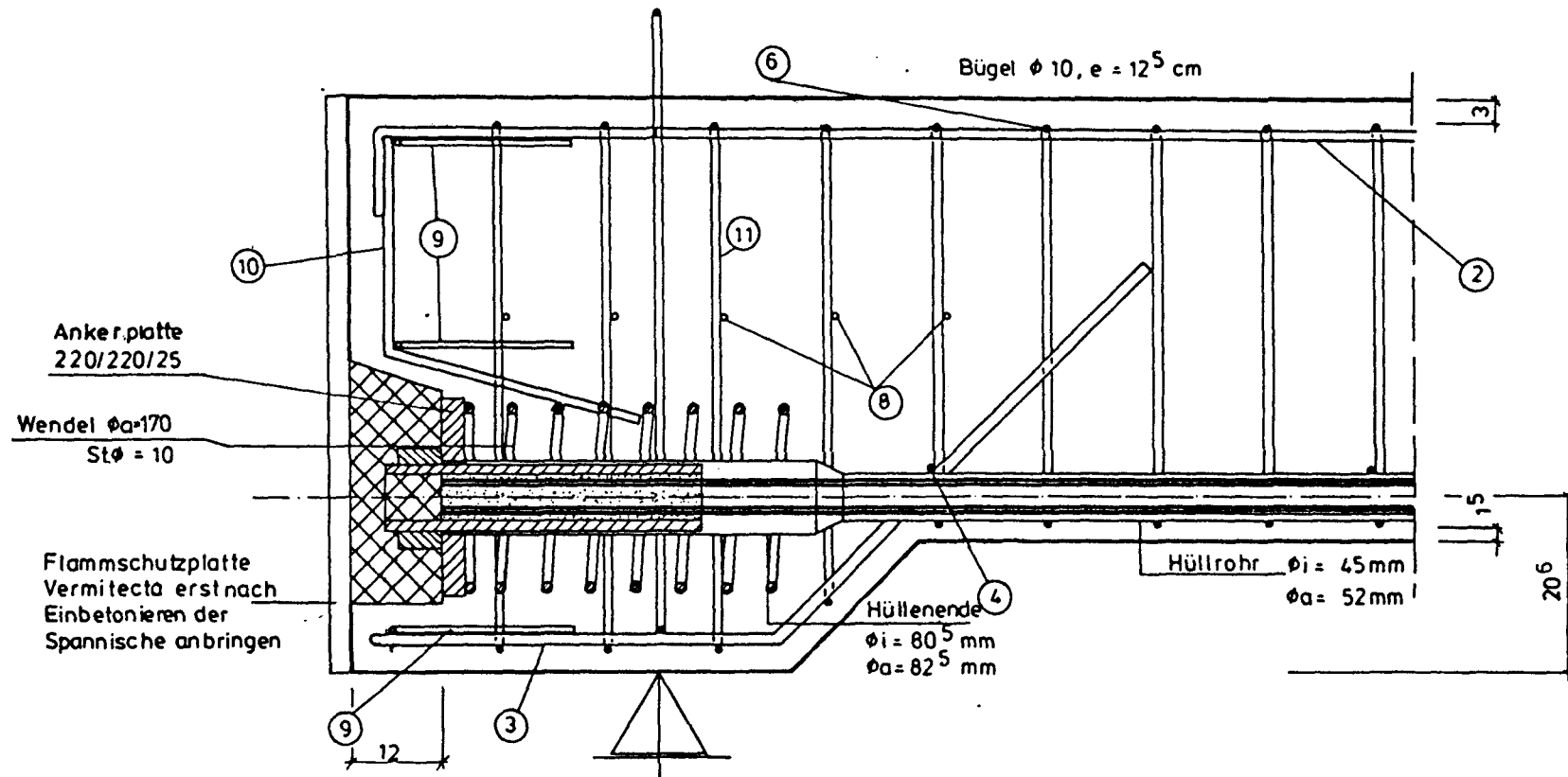
Die Versuchskörper wurden als schwach bewehrte Bauteile entworfen. D.h., die Spannglied-Bewehrungsmenge wurde so festgelegt, daß im Bruchzustand nach Möglichkeit das Versagen der Spannglieder durch Erschöpfung ihrer Festigkeit als primäre Bruchursache maßgebend wird.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf den Regelquerschnitt im Feldbereich mit den Abmessungen $b/d = 25/50$ cm. Das Spannglied wurde in einem Stahlblech-Hüllrohr mit einem Innendurchmesser von 45 mm und einem Außendurchmesser von 52 mm eingelegt. Der Abstand der Spanngliedachse zur unteren Betonoberfläche betrug 56 mm und zu den seitlichen Betonoberflächen jeweils 125 mm. Aus der radialsymmetrischen Anordnung der HLV-Elemente auf einem Kreis mit einem Durchmesser von ca. 32 mm ergab sich ein minimaler Achsabstand von 40 mm für das am unteren Scheitelpunkt des Kreises liegende HLV-Element. Als Achsabstand wird nach DIN 4102 Teil 4 der Abstand zwischen der Längsachse des Bewehrungsstabes (HLV-Element) und der beflamten Betonoberfläche bezeichnet.

Zusätzlich zur Spannbewehrung besaßen die Versuchskörper eine leichte konstruktive Bewehrung (Mindestbewehrung). Im Bild 2.4 ist der Schal- und Bewehrungsplan der Versuchskörper und im Bild 2.5 ein Längsschnitt im Bereich der Spannanker dargestellt.

Die Versuchskörper wurden im Rahmen einer Großbaustelle in Düsseldorf von Mitarbeitern des Auftraggebers hergestellt. Die Herstellung erfolgte in zwei Arbeitsgängen. Zunächst wurden die Balken Ende Januar 1986 betoniert und dann durch Folien abgedeckt und bis zum Vorspannen Mitte April 1986 auf der Baustelle gelagert. Nach dem Vorspannen wurden die Versuchskörper in der Versuchshalle des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz annähernd unter Normklima ($20\text{ °C}/65\text{ \% r.F.}$) ca. 16 Wochen gelagert. Während der Lagerungszeit im Institut wurden Anfang Juni 1986 die Spann-Nischen in den Stirnseiten der Versuchskörper ausbetoniert und Ende Juli 1986 die Spannkanäle verpreßt. Die Verpreßarbeiten wurden von Mitarbeitern des Auftraggebers durchgeführt.

Bild 2.5: Längsschnitte Spannanker



Längsschnitt Spannanker

2.2 Baustoffkennwerte

Für die Versuchskörper wurde die Betonfestigkeitsklasse B 45 angestrebt.

Zur Ermittlung der Betonfestigkeitsdaten wurden gleichzeitig mit den Versuchskörpern sechs Würfel mit der Kantenlänge 15 cm hergestellt. Davon wurden drei Würfel nach DIN 1048 gelagert und im Alter von 28 Tagen zur Feststellung der Würfeldruckfestigkeit β_{w28} abgedrückt. Diese Prüfungen wurden im Zentrallabor der STRABAG Bau-AG in Köln durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Brandversuche wurden die restlichen drei Würfel, die in unmittelbarer Nähe der Versuchskörper gelagert wurden, zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit β_w geprüft. Diese Prüfungen wurden im Labor der Amtlichen Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen in Braunschweig durchgeführt. Außerdem wurde für jeden Würfel die Festbetonrohddichte ermittelt. Die Druckfestigkeit β_{w28} und β_w sowie die Rohddichte enthält Bild 2.6, angegeben sind die Mittelwerte aus jeweils drei Prüfungen.

Zusätzlich ist im Bild 2.6 der Feuchtigkeitsgehalt des Betons zum Zeitpunkt der Brandversuche aufgeführt. Der Feuchtigkeitsgehalt wurde aus Bruchstücken der Würfel ermittelt, die zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit β_w zum Zeitpunkt der Brandversuche abgedrückt wurden. Für die Feuchtigkeitsbestimmung wurden insgesamt sechs Bruchstücke aus dem Oberflächenbereich und dem Querschnittsininneren der Würfel ausgesucht. Die Bruchstücke wurden in einem Trockenofen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Im Bild 2.6 ist der Feuchtigkeitsgehalt, bezogen auf das Trockengewicht, angegeben.

	Alter der Probekörper	
	28 Tage	188 Tage
Druckfestigkeit (N/mm ²)	49	43
Rohddichte (kg/dm ³)	2,35	2,34
Feuchtigkeit (Gew.-%)	2,6 - 3,4	

Bild 2.6: Betonfestigkeiten (Würfel mit 15 cm Kantenlänge), Rohddichten und Feuchtigkeitsgehalt

Das Festigkeitsverhalten der HLV-Elemente wurde vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, untersucht. Dort wurden für 20 Materialproben im Kurzzeitversuch die Bruchkräfte ermittelt. Als 5 %-Fraktilwert der Grundgesamtheit ergab sich für den HLV-Stab mit einem Durchmesser von 7,5 mm eine Bruchkraft von 71,3 kN.

Für die Verpreßmörtel wurden im Zentrallabor der STRABAG Bau-AG in Köln die Kennwerte für die Druck- und Biegezugfestigkeit sowie für die Rohdichte ermittelt. Als Probekörper wurden Prismen mit den Abmessungen Länge/Breite/Dicke = 160/40/40 mm untersucht. Im Bild 2.7 sind die ermittelten Kennwerte, jeweils als Mittelwert von drei Proben, zusammengestellt.

	Reaktionsharz		Zementmörtel
	Einlauf	Auslauf	
Druckfestigkeit (N/mm ²)	55,3	57,8	55,3
Biegezugfestigk. (N/mm ²)	18,4	19,1	2,49
Rohdichte (kg/dm ³)	1,72	1,73	1,75

Bild 2.7: Baustoffkennwerte der Verpreßmörtel

2.3 Temperaturmeßquerschnitte

In jedem Versuchskörper wurden sieben Temperaturmeßquerschnitte symmetrisch zur halben Versuchskörperlänge angeordnet. Die Abstände der Temperaturmeßquerschnitte von der Symetrieachse in halber Versuchskörperlänge betrugen 0...115...207,5 und 272,5 cm. Im Bild 2.8 ist die Lage der Temperaturmeßquerschnitte dargestellt.

In jedem Temperaturmeßquerschnitt wurden die Temperaturen an vier Meßstellen am Hüllrohr gemessen. Die Meßstellen lagen am oberen und unteren Scheitelpunkt sowie an den beiden seitlichen Scheitelpunkten des Hüllrohres. Zusätzlich wurden in den mittleren Meßquerschnitten die Temperaturen an der oberen und unteren schlaffen Bewehrung gemessen (s. Bild 2.8).

Als Meßelemente wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Drahtdurchmesser 0,5 mm) verwendet.

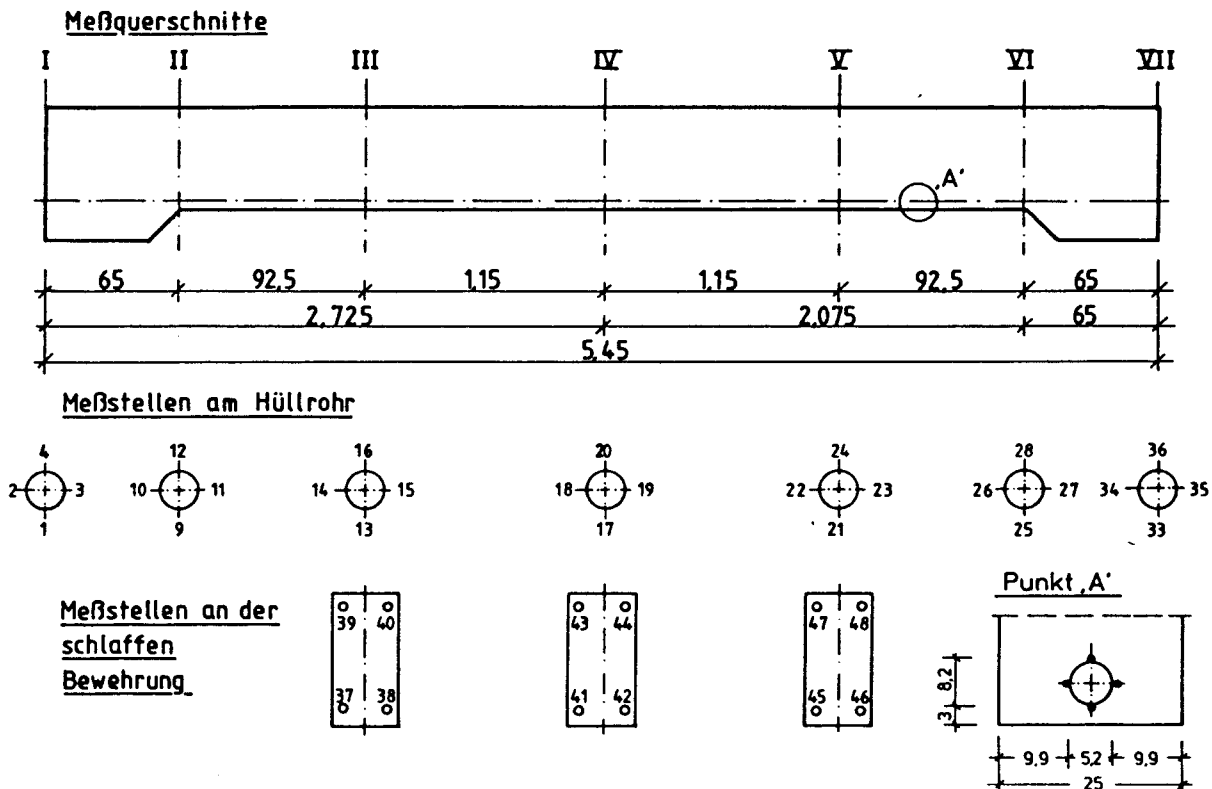
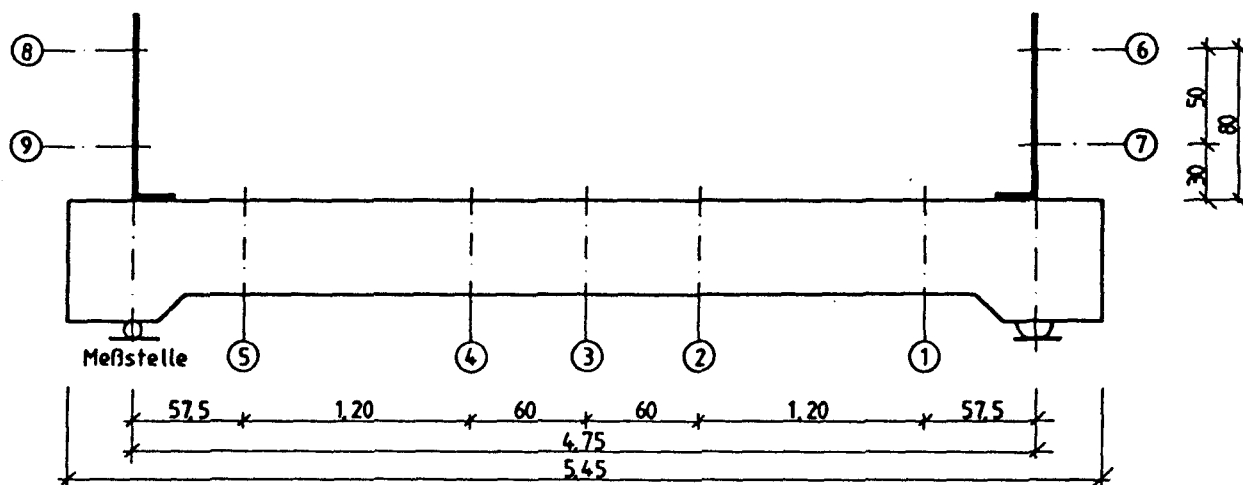


Bild 2.8: Lage der Temperatur-Meßquerschnitte

2.4 Verformungsmessungen

Mit Hilfe feiner Stahldrähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Drehpotentiometern mit Seilrollen liefen, wurden die Verformungen der Versuchskörper gemessen. Die horizontalen Verformungen wurden an der Stirnseite der Versuchskörper an zwei übereinanderliegenden Punkten aufgenommen.

Bei jedem Versuchskörper wurde an fünf Stellen die vertikale Verformung gemessen, wobei die mittlere Meßstelle in halber Spannweite angeordnet war und die anderen Meßstellen dann jeweils um 0,60 m bzw. 1,80 m zu den Auflagern hin versetzt angeordnet waren. Im Bild 2.9 ist die Lage der Meßstellen für die vertikale und horizontale Verformungsmessung angegeben.

AnsichtBild 2.9: Anordnung der Verformungs-Meßstellen2.5 Sonstige Beobachtungen

Während der gesamten Branddauer wurde das Verhalten der Versuchskörper augenscheinlich beobachtet und protokolliert. Ergänzend zu den Beobachtungen an der nichtbeflammten, zugänglichen Bauteiloberseite wurde die beflammete Bauteilunterseite durch Fenster in den Brandkammerwänden auf Feuchtheitsaustritt, eventuelle Betonabplatzungen und Rißbildung hin beobachtet.

3 Versuchsanordnung und -durchführung

3.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden als obere Abdeckung einer Brandkammer von 5,20 m Länge und 4,0 m Breite eingebaut. Die lichte Brandkammerhöhe betrug 2,45 m. Die Wände bestanden aus geschweißten Stahlrahmen, die innenseitig -genauso wie der Boden - mit feuerfestem Beton bekleidet waren. Die nicht vom Versuchskörper überdeckte obere Brandkammeröffnung wurde durch Fertigteile aus feuerfestem Beton abgedeckt, die auf den Brandkammerwänden auflagen und innen stumpf gegen die Versuchskörper stießen, wobei die Naht zwischen Versuchskörper und Abdeckplatte mit Mineralfaserwolle verstopft wurde. In den Bildern 3.2 und 3.3 ist die Versuchsanordnung dargestellt.

Die Beheizung der Brandkammer erfolgte durch drei bzw. vier Ölbrenner an den beiden Längsseiten unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 (9/77) bzw. ISO 834. Die Flammenachsen verliefen horizontal, 0,80 m über dem Brandkammerboden, senkrecht zur Längsachse der Versuchskörper. Die Flammenlänge betrug im allgemeinen etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden des Brandraums abgesaugt.

Die Brandraumtemperaturen wurden an sechs Meßstellen mit NiCr-Ni-Thermoelementen (\varnothing 3 mm) kontrolliert, wobei die Meßwerte gleichzeitig zur Steuerung der Einheits-Temperaturzeitkurve dienten. Die Meßstellenanordnung entsprach DIN 4102 Teil 2 (9/77) (s. Bild 3.1).

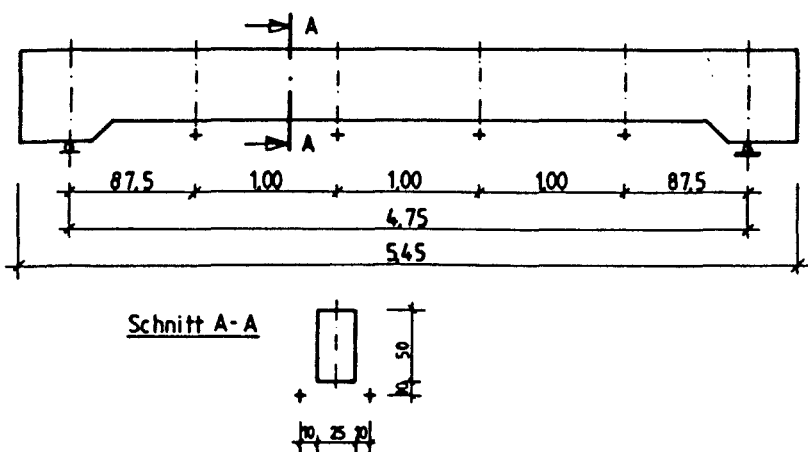
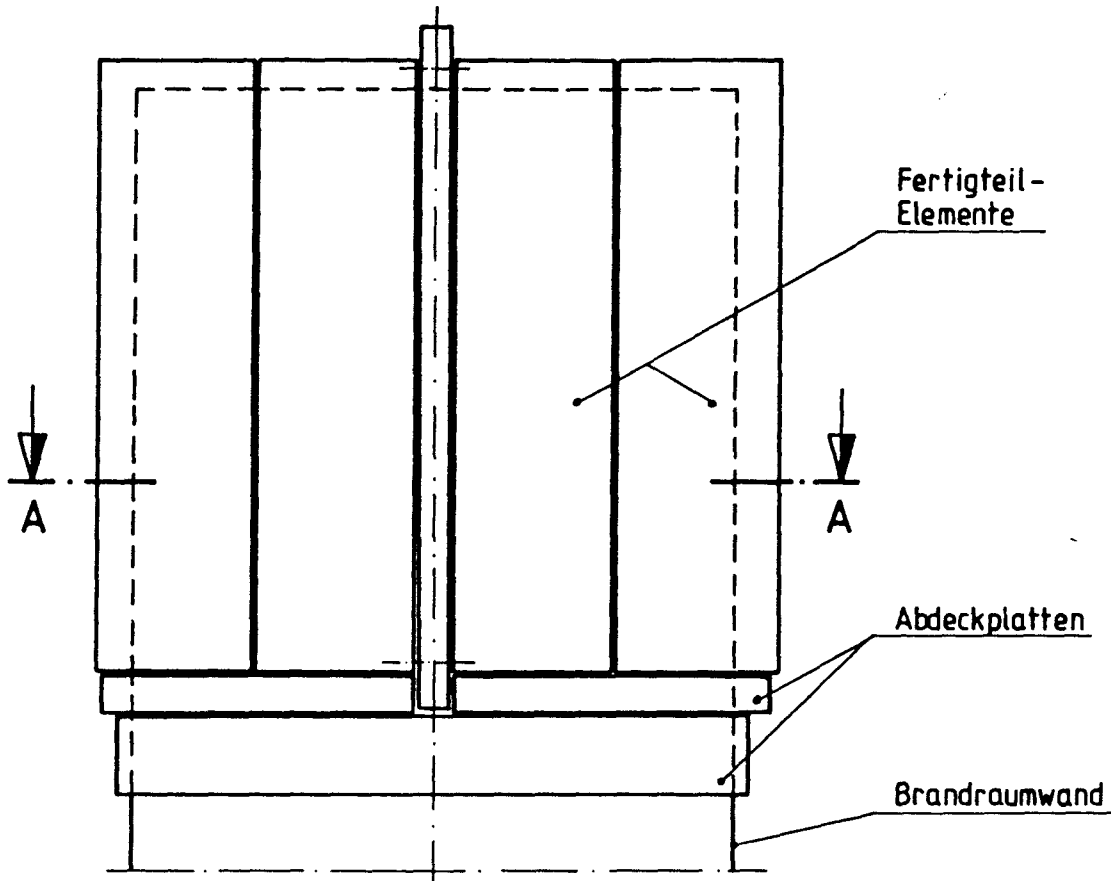


Bild 3.1: Lage der Brandraumtemperatur-Meßstellen

Draufsicht



Schnitt A-A

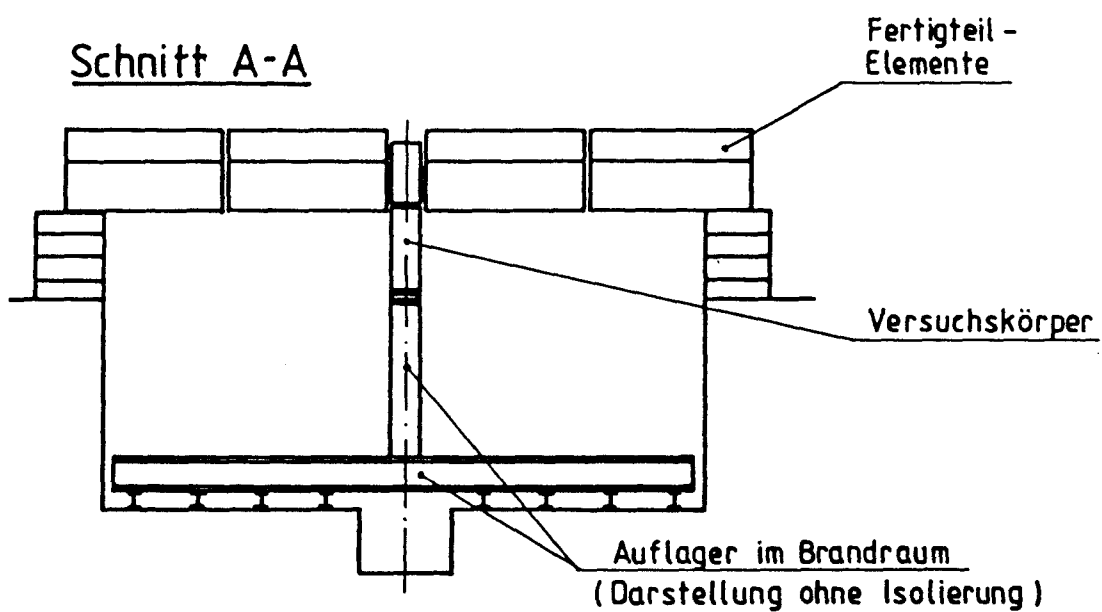
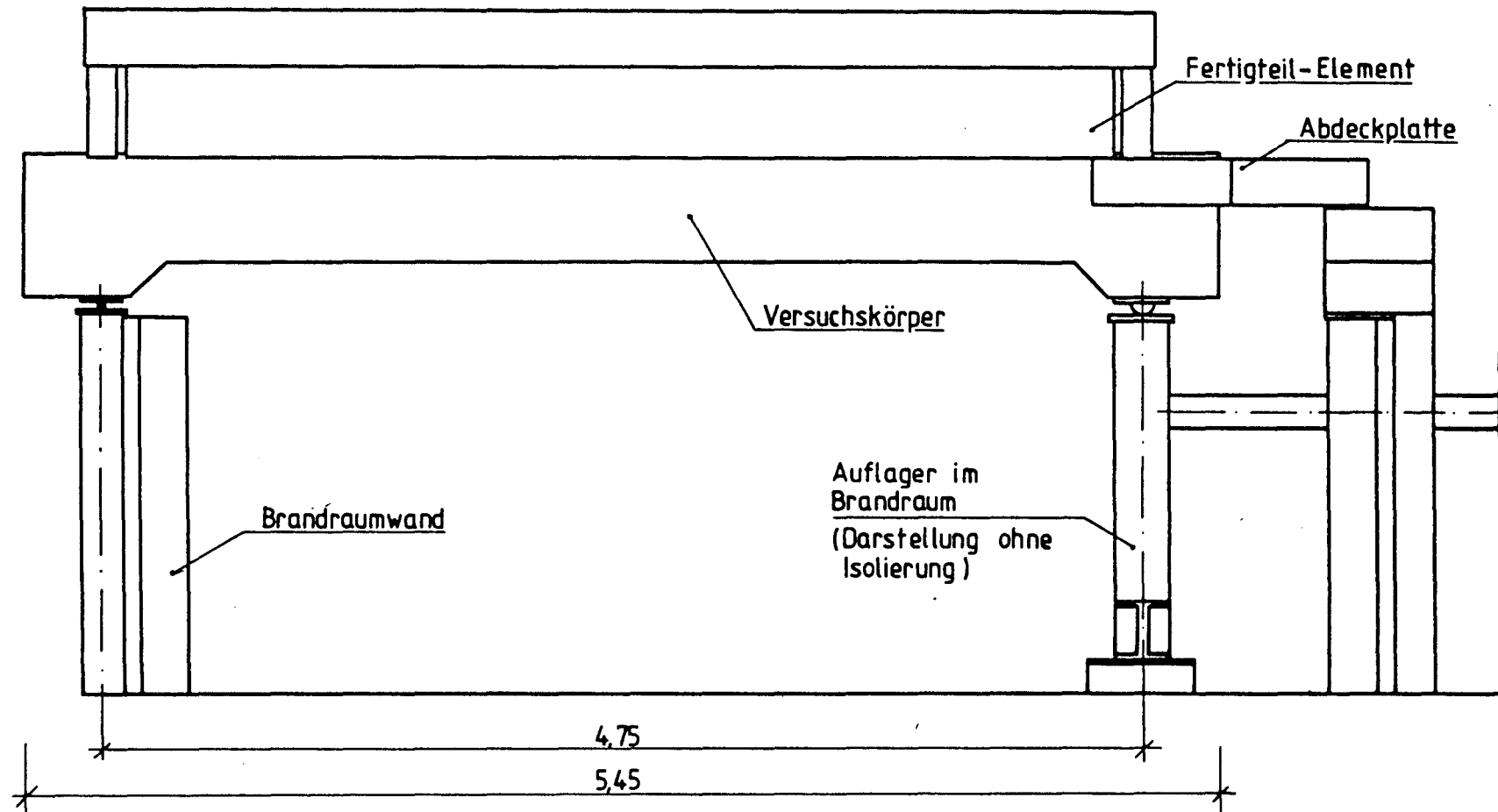


Bild 3.2: Versuchsanordnung: Draufsicht und Querschnitt

Längsschnitt



3.2 Einbau, Vorspannung und Belastung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden als statisch bestimmt gelagerte Einfeldkonstruktion mit einem verschieblichen und einem unverschieblichen Auflager eingebaut. Das unverschiebliche Auflager wurde durch ein zwischen zwei Stahlplatten liegendes Halbrund gebildet. Es wurde auf einer Stahlkonstruktion befestigt, die in der Brandkammer stand (siehe Bild 3.3). Dadurch wurde der Versuchskörper auf dieser Auflagerseite auch von der Stirnseite her dem Brand ausgesetzt. Das verschiebliche Auflager wurde außerhalb der Brandkammer auf der Brandkammerwand angeordnet. Es bestand aus zwei Stahlplatten mit zwischenliegendem Vollrund (Rollenlager). Beide Auflager sowie die Stahlkonstruktion in der Brandkammer wurden gegen übermäßige Erwärmung durch Isolierung geschützt.

Das Spannglied aus acht HLV-Elementen wurde mit rd. 252 kN vorgespannt. Dabei wurden die einzelnen HLV-Elemente mit $\sigma_{zu1} = 715 \text{ N/mm}^2$ ausgenutzt. Der Wert für σ_{zu1} ergab sich aus dem Rechenwert der Festigkeit $\beta_z = 1520 \text{ N/mm}^2$, der zur Berücksichtigung von Einflüssen infolge materialbedingter Alterung um 3 %, zur Berücksichtigung des Verhältnisses von Dauerstandsfestigkeit zur Kurzzeitfestigkeit um 30 % und zur Abdeckung eines sicherheitsbedingten Faktors um 30 % reduziert wurde.

Als Belastung wurden in Anlehnung an die statische Berechnung des Ingenieurbüros König und Heunisch, Frankfurt am Main, zwei Einzellasten von jeweils $P = 72 \text{ kN}$ aufgebracht. Die Belastung war so festgelegt worden, daß in Feldmitte an der unteren Querschnittsfaser die zulässige Betonbiegezugspannung nicht überschritten wurde. Die Einzellasten wurden durch hydraulische Pressen simuliert, die die Belastung während der Brandversuche konstant hielten. Durch längsliegende Traversen wurden die Pressenkräfte auf vier Krafteinleitungsbereiche in den Punkten 1/8, 3/8, 5/8 und 7/8 der Spannweite von 4,75 m übertragen. Im Bild 3.4 ist die Lastanordnung dargestellt.

Die Belastung erzeugte in Feldmitte zusammen mit den Momenten aus Eigengewicht der Versuchskörper, anteiligem Gewicht der Abdeckung, Gewicht der Lasttraversen usw. ein Moment von 97,9 kNm.

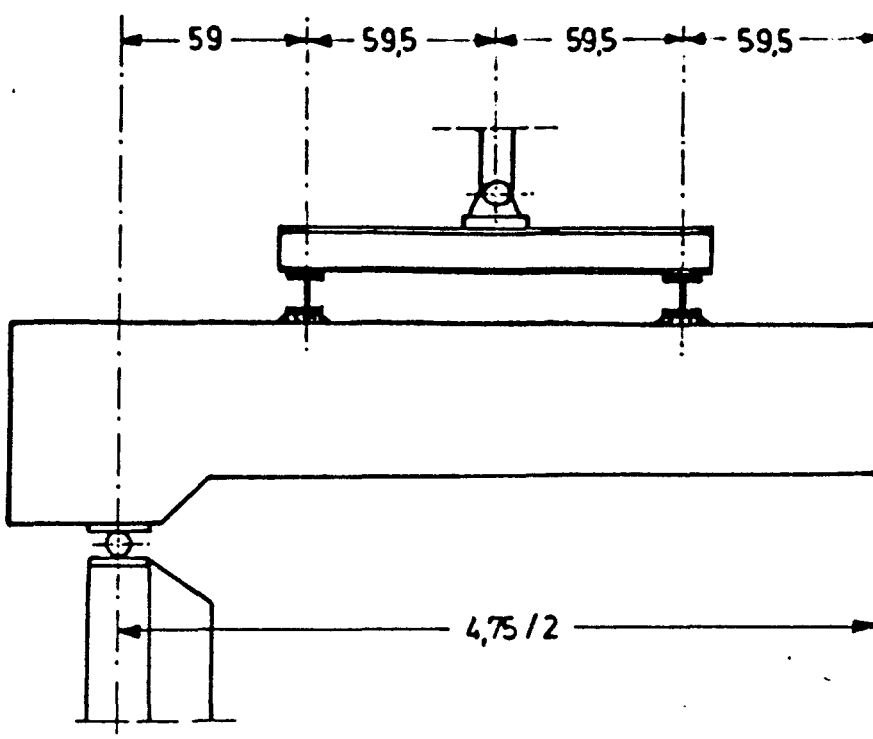


Bild 3.4: Lastanordnung

3.3 Bekleidung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden in unterschiedlichem Umfang mit wärmeisolierender Bekleidung versehen, um

- a) die Erwärmung der Verankerungselemente der HLV-Stäbe zu verzögern und
- b) explosionsartige Abplatzungen des Betonquerschnitts zu verhindern.

Das Erwärmungsverhalten des Auflagerbereichs mit den dort vorhandenen Verankerungselementen für die HLV-Stäbe wurde vor Beginn der Brandversuche rechnerisch untersucht. Als Ergebnis dieser rechnerischen Untersuchungen wurde festgelegt, daß zur Verhinderung einer zu raschen Erwärmung der Verankerungselemente eine 30 mm starke, wärmeisolierende Bekleidung auf der Stirnseite der Versuchskörper angebracht wird, die im Brandversuch vom Feuer umspült wird. Mit dieser Bekleidung wurde jeder Versuchskörper versehen.

Die Bekleidung zur Verhinderung von explosionsartigen Abplatzungen wurde bei jedem Versuchskörper in unterschiedlichem Umfang ausgeführt. Der jeweils festgelegte Umfang wurde aus den Ergebnissen des vorhergehenden Brandver-

suchs abgeleitet. Im Abschnitt 4 werden Art und Umfang der ausgewählten Bekleidung im Zusammenhang mit den Einzelversuchsberichten begründet. In Bild 3.5 ist in summarischer Form für jeden Versuchskörper die vorhandene Bekleidung zusammengestellt.

Versuchskörper	Bekleidung (zusätzlich zur Bekleidung der Stirnflächen)
HLV-1/86	keine
HLV-2/86	Bekleidung der Auflagerbereiche, jeweils 1,0 m von der Auflagerlinie ins Feld reichend. Bekleidung des Versuchskörpers seitlich und von unten mit 20 mm dicken VERMITECTA-Platten
HLV-3/86	Bekleidung des Versuchskörpers über die gesamte beflamnte Länge; an den Seitenflächen mit 10 mm und an der Unterfläche mit 15 mm dicken VERMITECTA-Platten

Bild 3.5: Bekleidung der Versuchskörper

3.4 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte die Aufnahme der Temperaturen, Verformungen und Pressenkräfte. Die Temperaturmeßwerte wurden im Abstand von einer Minute, die Verformungsmeßwerte und Pressenkräfte im Abstand von einer halben Minute auf eine Magnetkassette übertragen und zusätzlich auf einem Papiermitschrieb ausgegeben. Die Aufzeichnungen der Magnetkassette wurden nach Versuchsende zur rechnergestützten Datenauswertung benutzt.

Neben der elektronischen Meßwerterfassungsanlage wurde ein Kompensograph mit angeschlossenen 12-Kanal-Punkt drucker zur Aufzeichnung der Brandraumtemperaturen eingesetzt.

4 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden -geordnet nach Meßwertgruppen (z.B. Verformungen, Temperaturen)- in der Reihenfolge der durchgeführten drei Brandversuche (HLV-1/86 bis HLV-3/86) dargestellt.

Die Zuordnung zwischen Meßstellen-Nummer und Lage der Meßstelle im Versuchskörper ist in Bild 4.1 aufgeführt. Zusätzliche Angaben über die Lage der einzelnen Meßstellen sind in Abschnitt 2 enthalten.

Meßwertgruppe	Meßstellen-Nummer	Lage der Meßquerschnitte im Versuchskörper (jeweils vom nicht beflamten Auflager betrachtet)
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements	1 - 4	am nicht beflamten Versuchskörperende
	5 - 8	Meßstellen nicht vorhanden
	9 - 12	am Anschnitt Voute/Feldquerschnitt
	13 - 16	im 1/4-Punkt der Spannweite
	17 - 20	Feldmitte
	21 - 24	im 3/4-Punkt der Spannweite
	25 - 28	am Anschnitt Voute/Feldquerschnitt
	29 - 32	Meßstellen nicht vorhanden
	33 - 36	am beflamten Versuchskörperende
Temp. der schlaffen Bewehrung	37 - 40	im 1/4-Punkt der Spannweite
	41 - 44	Feldmitte
	45 - 48	im 3/4-Punkt der Spannweite
Vertikale Verformung	1	im 1/8-Punkt der Spannweite
	2	im 3/8-Punkt der Spannweite
	3	in Feldmitte
	4	im 5/8-Punkt der Spannweite
	5	im 7/8-Punkt der Spannweite
Horizontale Verformung	6, 7	am beflamten Versuchskörperende
	8, 9	am nicht beflamten Versuchskörperende

Bild 4.1: Zuordnung zwischen Meßwertgruppe, Meßstellen-Nummer und Lage des Meßquerschnitts im Versuchskörper

4.1 Brandraumtemperaturen

In den Brandversuchen wurde die Einheits-Temperaturzeitkurve gemäß DIN 4102 Teil 2 (9/77) im zulässigen Toleranzbereich eingehalten. Im Bild 4.2 sind die Meßwerte der Brandraumtemperaturen als dunkel angelegtes Streuband exemplarisch für den Brandversuch HLV-2/86 dargestellt; die entsprechenden Brandraumtemperaturen der Versuche HLV-1/86 und HLV-3/86 sind in den Anlagen 28 und 29 wiedergegeben.

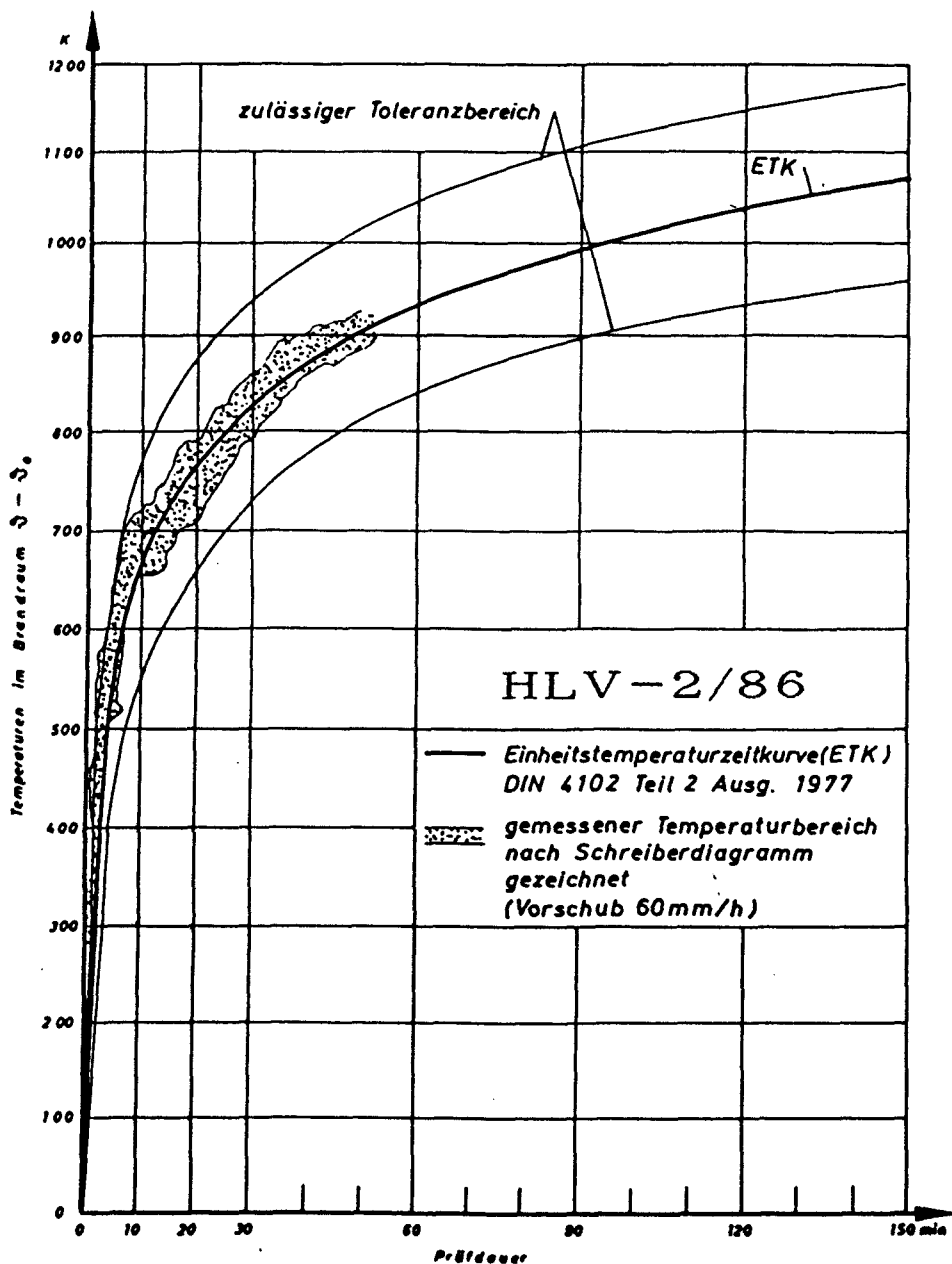


Bild 4.2: Brandraumtemperaturverlauf im Versuch HLV-2/86

4.2 Druck im Brandraum

Während der Brandversuche herrschte im Brandraum ein Innenraumluftdruck (statischer Überdruck) von etwa + 9,0 Pa.

4.3 Verformungen der Versuchskörper

Die während der Brandversuche gemessenen vertikalen Verformungen (Durchbiegungen) sind in den Anlagen 1 bis 3, die horizontalen Verformungen an den Auflagern (Verschiebungen) sind in den Anlagen 4 bis 6 dargestellt.

4.4 Temperaturen der schlaffen Bewehrung

In drei Meßquerschnitten wurden die Temperaturen an der oben und unten liegenden schlaffen Bewehrung gemessen. In jedem Meßquerschnitt bezeichnen die beiden niedrigen Meßstellen-Nummern die Temperaturen an der unten liegenden schlaffen Bewehrung, während die beiden hohen Meßstellen-Nummern für die Temperaturverläufe an der oberen schlaffen Bewehrung gelten. In den Anlagen 7 bis 15 sind die gemessenen Temperaturverläufe an der schlaffen Bewehrung dargestellt.

4.5 Temperaturen am Hüllrohr der HLV-Elemente

Im Abschnitt 2.3 wird erläutert, daß zu jedem Temperaturmeßquerschnitt vier Thermoelemente (Meßstellen) gehörten, die seitlich sowie im oberen und unteren Scheitelpunkt des Hüllrohrs befestigt waren. Die Meßstellen waren in folgender Reihenfolge numeriert: die unterste Meßstelle hatte die niedrigste, die an den seitlichen Scheitelpunkten befestigten die mittleren und die am oberen Scheitelpunkt befestigte Meßstelle die höchste Nummer (s. Bild 2.7). Die zeitliche Temperaturentwicklung für alle Meßstellen am Hüllrohr der HLV-Elemente ist in den Anlagen 16 bis 27 dargestellt.

4.6 Sonstige Beobachtungen

4.6.1 Versuchskörper HLV-1/86

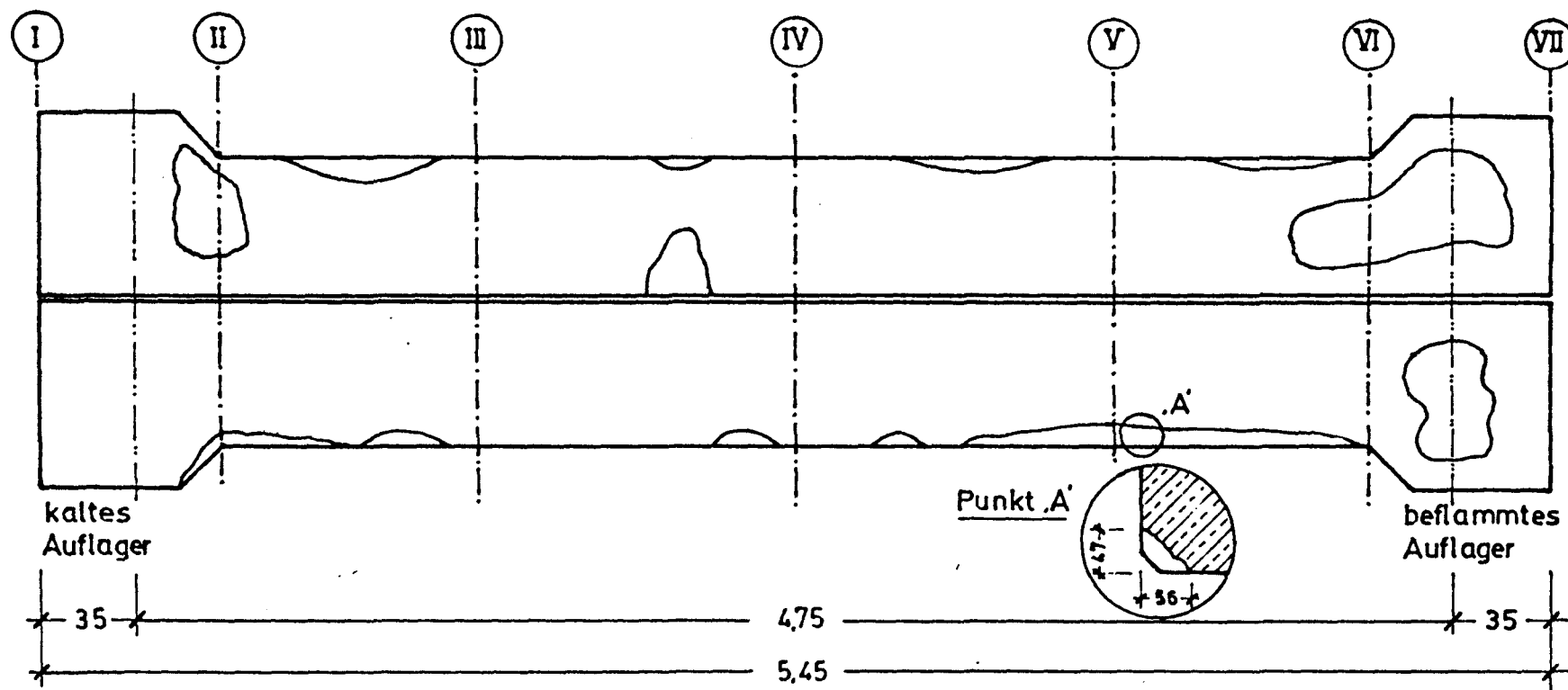
Vers.-minute	Beobachtungen
3	Explosionsartige Eckabplatzungen an der Unterseite des Versuchskörpers in Feldmitte
17	Eckabplatzungen haben sich über die ganze Länge der Unterseite des Versuchskörpers ausgedehnt
ab 20	Explosionsartige Abplatzungen an den Seitenflächen in Auf-lagernähe und im Bereich der Vouten an der Unterseite des Versuchskörpers
28	Scharfes, hartes, kurzes Knallgeräusch (vermutlich im Bereich des nichtbeflammten Auflagers).
36	Scharfes, hartes, kurzes Knallgeräusch (vermutlich im Bereich des nichtbeflammten Auflagers).
≤ 40	kein ausgeprägtes Rißbild vorhanden
40	Versuchsende

-) Die genaue Lage des Knallgeräuschs konnte nicht festgestellt werden. Erschwert wurde die Wahrnehmung der Knallgeräusche durch den relativ hohen Geräuschpegel, der durch das während der Brandversuche laufende Gebläse verursacht wurde. Unter Berücksichtigung dieser Umstände kann nicht ausgeschlossen werden, daß nur die ausgeprägtesten Knallgeräusche registriert wurden.

Nach dem Brandversuch wurde die Lage und Tiefe der Abplatzungen aufgezeichnet. Die Tiefe der großflächigen Abplatzungen betrug maximal 30 mm, im Mittel war die Betonschicht um 10 bis 15 mm abgeplatzt. Die Eckabplatzungen hatten Kathetenlängen zwischen 30 und 70 mm, im Maximum 100 mm. Die Versuchskörper wurden mit Abfasungen von 20 mm Kathetenlänge hergestellt. Im Bild 4.3 sind die Lage der großflächigen Abplatzungen auf den Seitenflächen und die Eckabplatzungen an der Kanten zwischen Seiten- und Bodenfläche des Versuchskörpers HLV-1/86 dargestellt. Zusätzlich sind im Bild 4.3 die Lage der Temperatur-Meßquerschnitte eingezeichnet.

Bild 4.3: Abplatzungen am Versuchskörper HLV-1/86

Temperatur MQ:



4.6.2 Versuchskörper HLV-2/86

Vers.-minute	Beobachtungen
6	Explosionsartige Eckabplatzungen an der Unterseite des Versuchskörpers, im mittleren Drittel der Spannweite
14	Eckabplatzungen haben sich über die ganze Länge der Unterseite des Versuchskörpers ausgedehnt
16 - 25	wegen starker Rauchbildung keine Beobachtungen in der Brandkammer möglich
33	Scharfes, hartes, kurzes Knallgeräusch, dessen örtlicher Ursprung nicht festzustellen ist
42	Am beflamten Auflager: am Ende der Bekleidung explosionsartige Abplatzungen über die gesamte Höhe des Versuchskörpers
≤ 51	kein ausgeprägtes Rißbild vorhanden
51	Versuchsende

4.6.3 Versuchskörper HLV-3/86

Vers.-minute	Beobachtungen
97	Scharfes, hartes, kurzes Knallgeräusch (vermutlich im Bereich des nichtbeflammten Auflagers)·
101	Scharfes, hartes, kurzes Knallgeräusch (vermutlich im Bereich des nichtbeflammten Auflagers)·
103	Versuchsende

·) s. Bemerkungen im Abschnitt 4.6.1

Ungefähr 60 Minuten nach Versuchsende brach der Versuchskörper ungefähr 1,7 m vom nichtbeflammten Auflager entfernt durch und fiel in die Brandkammer.

4.7 Zusätzliche Untersuchungen

An den Versuchskörpern HLV-1/86 und HLV-3/86 wurden nach dem Brandversuch zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. Beim Versuchskörper HLV-1/86 wurde die Tragfähigkeit nach der Brandbeanspruchung (Resttragfähigkeit) ermittelt; beim Versuchskörper HLV-3/86 wurde das Spannglied nach dem Brandversuch ausgebaut und auf eventuelle Schädigungen untersucht.

4.7.1 Tragfähigkeit nach dem Brandversuch

Um die nach dem Brandversuch vorhandene Resttragfähigkeit festzustellen, wurde der Versuchskörper HLV-1/86 -nach Abkühlung auf Raumtemperatur- noch einmal belastet. Die Belastung, zwei Einzellasten jeweils im Abstand von 1,79 m von den Auflagern, wurde stufenweise bis zum Bruch gesteigert. Der Bruch trat auf bei einem Gesamtmoment in Feldmitte von 97,6 kNm, d.h. bei annähernd der gleichen Größe des Momentes, die auch im Brandversuch in Feldmitte vorhanden gewesen war (s. Abschnitt 3.2: $M_{ges} = 97,9 \text{ kNm}$).

Im Rißbild dominierte ein deutlicher Riß im Bereich zwischen den beiden Einzellasten. Der Riß bildete sich ca. 2 m von dem Auflager entfernt, das im Brandversuch vollständig beflammt war. Der Versuchsträger versagte durch Ausfall der Beton-Druckzone über dem Riß. Das Rißbild und die Versagensform deuten darauf hin, daß nach dem Brandversuch im Versuchskörper mangelhafter Verbund zwischen Spannbewehrung und umgebenden Auspreßmörtel vorhanden war.

4.7.2 Spannglied nach dem Brandversuch

Der Versuchskörper HLV-3/86 wurde für eine augenscheinliche Untersuchung des Spanngliedes nach der Brandbeanspruchung benutzt.

Nachdem der Versuchskörper auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde das Spannglied vorsichtig ausgebaut. Nach Entfernen des Hüllrohrs und des Auspreßmörtels wurden die einzelnen HLV-Elemente augenscheinlich untersucht, insbesondere auf Rißbildung und nach Bruchstellen.

Im Bereich der Auflager lag der Mittelpunkt der acht radialsymmetrisch angeordneten HLV-Elemente annähernd zentrisch im Hüllrohr. Nur in Feldmitte war der Mittelpunkt der HLV-Elemente um bis zu 3 mm gegenüber dem Mittelpunkt des Hüllrohrs nach unten verschoben. Dadurch wurde die Überdeckung mit Aus-

preßmörtel für die am unteren Scheitelpunkt angeordneten HLV-Elemente auf 1,5 bis 2 mm reduziert.

An den beiden unteren HLV-Elementen, d.h. den beiden HLV-Elementen, die der beflamnten Unterseite des Versuchskörpers am nächsten lagen, wurden Bruchstellen festgestellt. Sie lagen 1,95 m bzw. 2,50 m von der Auflagerlinie des nicht beflamnten Auflagers entfernt. Die HLV-Elemente waren an den Bruchstellen auf einer Länge von rund 3 cm beschädigt. Die einzelnen Fasern waren in diesem Bereich an unterschiedlichen Stellen zerrissen, wodurch keine glatte Bruchfläche, sondern eine fransenförmige Verzahnung der beiden Enden des HLV-Elementes, entstand.

4.8 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die drei Versuchskörper waren hinsichtlich der Abmessungen und der konstruktiven Ausbildung gleich. Unterschiede bestanden nur hinsichtlich des verwendeten Auspreßmörtels in den Spannkämen und hinsichtlich der Größe der Bereiche der Bauteiloberfläche, die mit wärmeisolierender Bekleidung geschützt waren.

Die drei Brandversuche wurden mit gleich großer statischer Belastung durchgeführt. Sie entsprachen den Angaben, die der Bemessung der Versuchskörper zugrunde lag. Der Lastausnutzungsgrad für die Versuchskörper, d.h. das Verhältniss von vorhandener Last zur zulässigen Last, kann erst nach Einführung der Bemessungs- und Konstruktionsvorschrift für Bauteile mit Bewehrung aus HLV-Elementen angegeben werden.

4.8.1 Verformungen

Die vertikalen Verformungen wurden nach unten, d.h. als Durchbiegungen in Richtung der Belastung, positiv gezählt. Die horizontalen Verformungen an den Auflagern wurden als Verschiebungen in Richtung der Versuchskörpermitte jeweils positiv gezählt, d.h. eine infolge Durchbiegung entstandene Verdrehung des Auflagerquerschnitts um die Auflagerachse wurde als positive horizontale Verformung registriert, während eine Ausdehnung des Versuchskörpers (Verlängerung) als negative horizontale Meßwerte aufgenommen wurden.

Die zeitliche Entwicklung der vertikalen und horizontalen Verformungen waren für die beiden Versuchskörper HLV-1/86 und HLV-2/86, bei denen keine bzw. nur im Auflagerbereich eine wärmeisolierende Bekleidung angebracht war, sehr ähnlich (vergl. Bild 4.4). In der ersten Phase der Brandeinwirkung wuchsen die vertikalen Verformungen in Feldmitte zunächst mit annähernd 1 mm/min an; dann verringerte sich der Verformungszuwachs auf ca. 0,5 mm/min und schließlich, unmittelbar vor Versuchsende, wurden die vertikalen Verformungen sprunghaft größer.

Die Auswertung der für jedem Versuchskörper an fünf Stellen aufgezeichneten vertikalen Verformungen ergaben eine annähernd symmetrische Biegefigur.

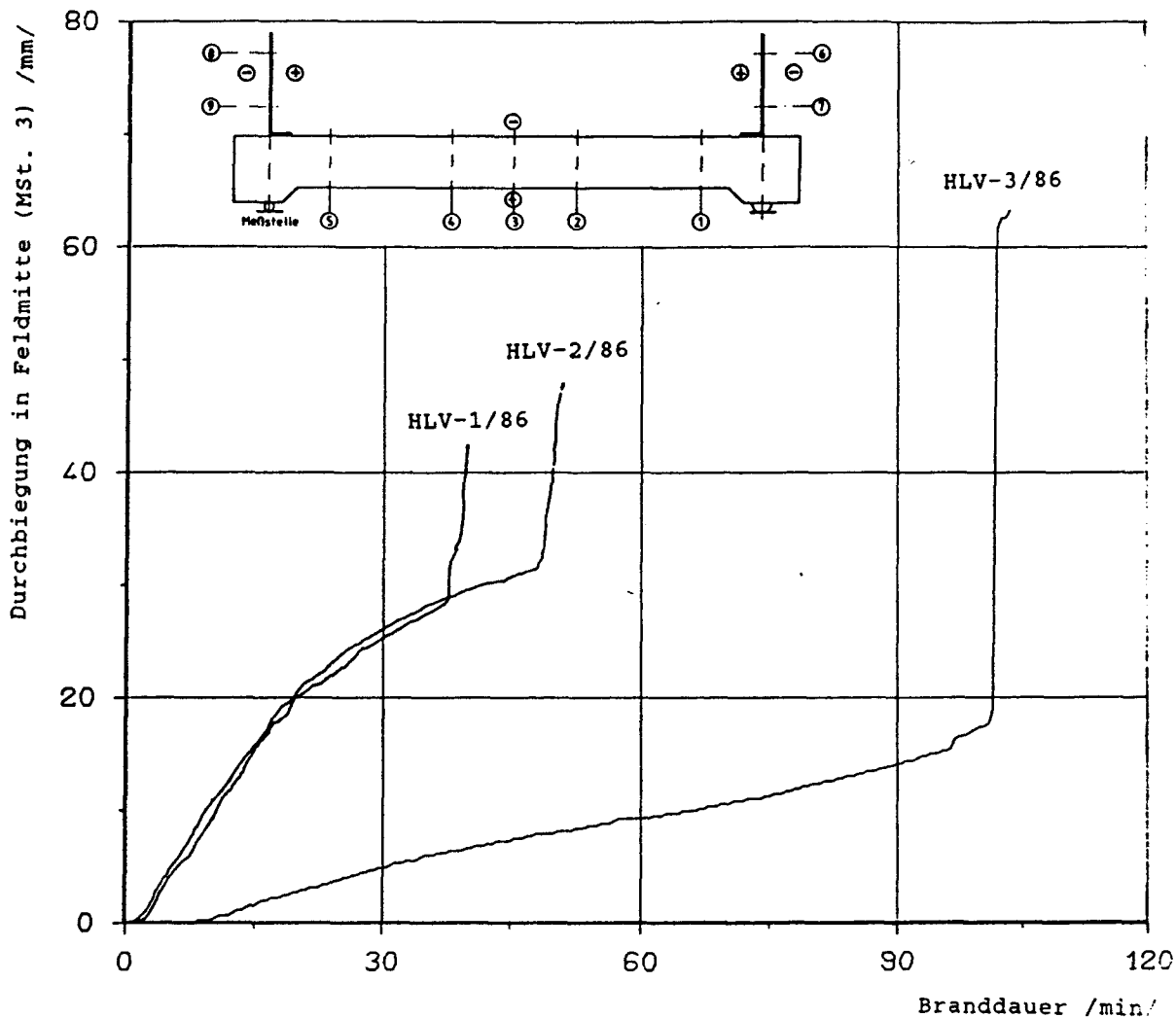


Bild 4.4: Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte für die Versuchskörper HLV-1/86, HLV-2/86 und HLV-3/86

Die im Bereich der Auflagerlinien gemessenen horizontalen Verformungen waren am verschieblichen und unverschieblichen Auflager hinsichtlich der Rotationsanteile annähernd gleich (Vergleich der Differenz zwischen den an einem Auflager gemessenen beiden Werten). Am unverschieblichen Auflager (Meßstelle 6 und 7) ergab die rechnerische Überprüfung der beiden aufgezeichneten Meßwerte, daß über die gesamte Branddauer der Rotationsmittelpunkt annähernd mit der Auflagerachse zusammenfiel, d.h., die angestrebte Unverschieblichkeit des Auflagers wurde durch die konstruktive Ausbildung des Auflagers erreicht.

Am verschieblichen Auflager (Meßstelle 8 und 9) wurden die positiv zählenden horizontalen Verformungen infolge Rotation überlagert von negativ zählenden Anteilen infolge Dilatation, wodurch die aufgezeichneten Meßwerte teilweise negativ wurden.

Beim vollständig bekleideten Versuchskörper HLV-3/86 wurde ein fast linearer Verformungsverlauf mit einer Steigung von ca. 0,17 mm/min bis unmittelbar vor dem Versuchsende registriert. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde auch eine annähernd symmetrische Biegefigur gemessen.

Die horizontalen Verformungen zeigen annähernd gleich große Rotationsverformungen am verschieblichen und unverschieblichen Auflager, wobei die zusätzlichen horizontalen Verformungen infolge Dilatation am verschieblichen Auflager negative Meßwerte erzeugen. Drehpunkt der Rotationsbewegung am unverschieblichen Auflager war über die gesamte Branddauer die Auflagerachse.

In den aufgezeichneten Verformungsverläufen (Anlage 1 bis 6) sind die im Abschnitt 4.6 als scharfe, harte Knallgeräusche bezeichneten akustischen Beobachtungen sowohl bei den vertikalen wie auch bei den horizontalen Verformungsverläufen in Form von plötzlichen, sprunghaften Verformungsänderungen zu erkennen. Zur Verdeutlichung sind im Bild 4.5 für den Versuchskörper HLV-1/86 die vertikalen und horizontalen Verformungen untereinander dargestellt. Die sprunghafte Vergrößerung der vertikalen Verformung führte am unverschieblichen Auflager (Meßstelle 6 und 7) zu einer sprunghaften Vergrößerung der positiven und am verschieblichen Auflager (Meßwerte 8 und 9) der negativen horizontalen Verformungswerte. Die unterschiedlichen Vorzeichen deuten darauf hin, daß durch die plötzliche vertikale Verformungszunahme am unverschieblichen Auflager im wesentlichen die Rotation vergrößert wurde während am verschieblichen Auflager die positiv zählende Rotation von größeren, negativ zählenden Dilatationsanteilen überlagert wurde.

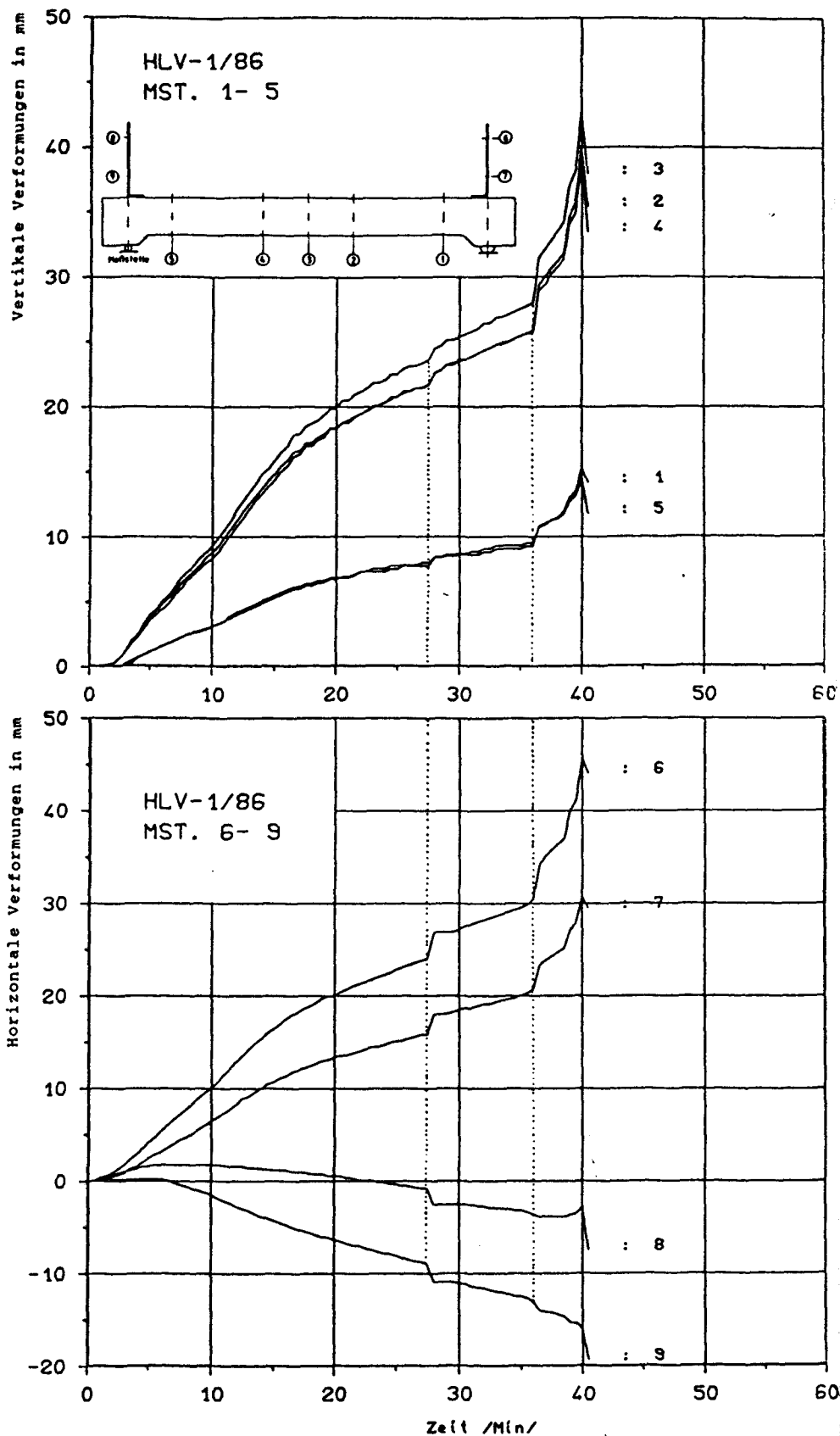


Bild 4.5: Vergleich der vertikalen und horizontalen Verformungen des Versuchskörpers HLV-1/86

4.8.2 Temperaturentwicklung

Die aufgezeichneten Temperaturverläufe an der schlaffen Bewehrung und am Hüllrohr der HLV-Elemente zeigen im Bereich von $T = 100\text{ °C}$ bis $T = 150\text{ °C}$ zum Teil eine deutliche Verzögerung der Erwärmung, verursacht durch die bei diesen Temperaturen zum Verdampfen des im Beton enthaltenen Wassers verbrauchte Energie. Die dabei gemessenen "fiebrigen" Temperaturverläufe sind z.B. auf die Inhomogenität des Betons und der daraus resultierenden zufälligen Rißbildung, verbunden mit plötzlichen, verstärkten Wasseransammlungen an Temperaturmeßstellen, zurückzuführen.

4.8.2.1 Schlaaffe Bewehrung

Die Temperaturen der schlaffen Bewehrung wurden direkt am Bewehrungsstab gemessen (s. Abschnitt 2.3).

In den Brandversuchen HLV-1/86 und HLV-3/86 blieben die Temperaturen an der schlaffen Längsbewehrung unter 300 °C und im Brandversuch HLV-2/86 unter 350 °C , d.h. durch Temperatureinflüsse wurde die Streckgrenze der Betonstahlbewehrung um weniger als 20 % reduziert und damit die Tragfähigkeit der leichten konstruktiven Bewehrung nur geringfügig verringert.

4.8.2.2 HLV-Elemente

Die Temperaturen der HLV-Elemente konnten aus versuchstechnischen Gründen nicht direkt gemessen werden. Für sie wurden deshalb stellvertretend in sieben Meßquerschnitten mit jeweils vier Meßstellen die Temperaturentwicklung am Hüllrohr des Spannglieds ermittelt (s. Abschnitt 2.3).

Im Bild 4.6 sind die Temperaturen für die beiden Meßquerschnitte I und VII an den Stirnseiten der Versuchsträger im Bereich der Spannischen dargestellt. Für die Meßstellen 1 - 4 im Meßquerschnitt I, d.h. dem Meßquerschnitt außerhalb der Brandkammer am nichtbeflammten Auflager, wurden in den drei Brandversuchen keine Temperaturerhöhung festgestellt. Die Temperaturen der Meßstellen 33 - 36 im Meßquerschnitt VII am voll beflamten Auflager liegen jeweils in einem sehr engen Streuband; deutlich ist die schnelle Er-

wärmung im Brandversuch HLV-1/86 zu erkennen, bei dem der Versuchskörper im Bereich des beflamten Auflagers nur an der Stirnseite mit wärmeisolierender Bekleidung versehen war. In den Brandversuchen HLV-2/86 und HLV-3/86 waren die Versuchskörper auch an den Seiten- und Bodenflächen mit Isolierung verkleidet. In beiden Brandversuchen wurde ein annähernd identischer Temperaturverlauf gemessen. Keine Meßstelle im Bereich der Spannischen erreichte Temperaturen von über 100 °C.

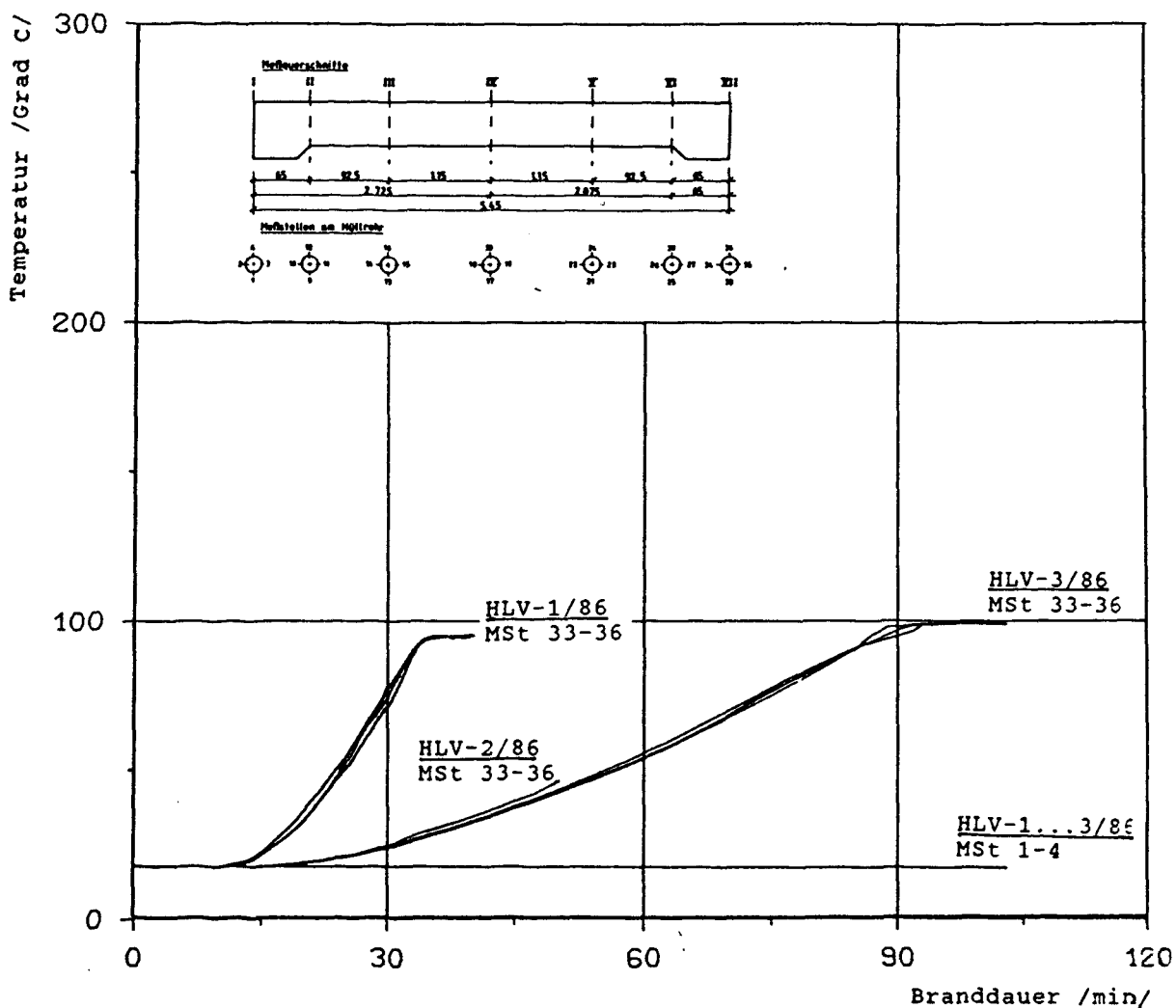


Bild 4.6: Temperaturentwicklung am Hüllrohr im Bereich der Spannischen

Die Temperaturentwicklung in den Meßquerschnitten II und VI, d.h. den Meßquerschnitten im Übergangsbereich zwischen Voute und Regelquerschnitt, wird im Bild 4.7 für den Brandversuch HLV-1/86 und im Bild 4.8 für die Brandversuche HLV-2/86 und HLV-3/86 dargestellt. Im Bild 4.7 sind zusätzlich die mittleren Temperaturverläufe der Meßwerte 9 - 12 bzw. 25 - 28 eingezeichnet. Sie folgen in etwa den Meßwerten an den seitlichen Scheitelpunkten (Meßstelle 10 und 11 bzw. 26 und 27). Der Vergleich der Temperaturverläufe vom Brandversuch HLV-1/86 (Bild 4.7) und von den Brandversuchen HLV-2/86 bzw. HLV-3/86 (Bild 4.8) macht den verzögernden und gleichzeitig "glättenden" Einfluß der wärmeisolierenden Bekleidung auf die Temperaturentwicklung deutlich.

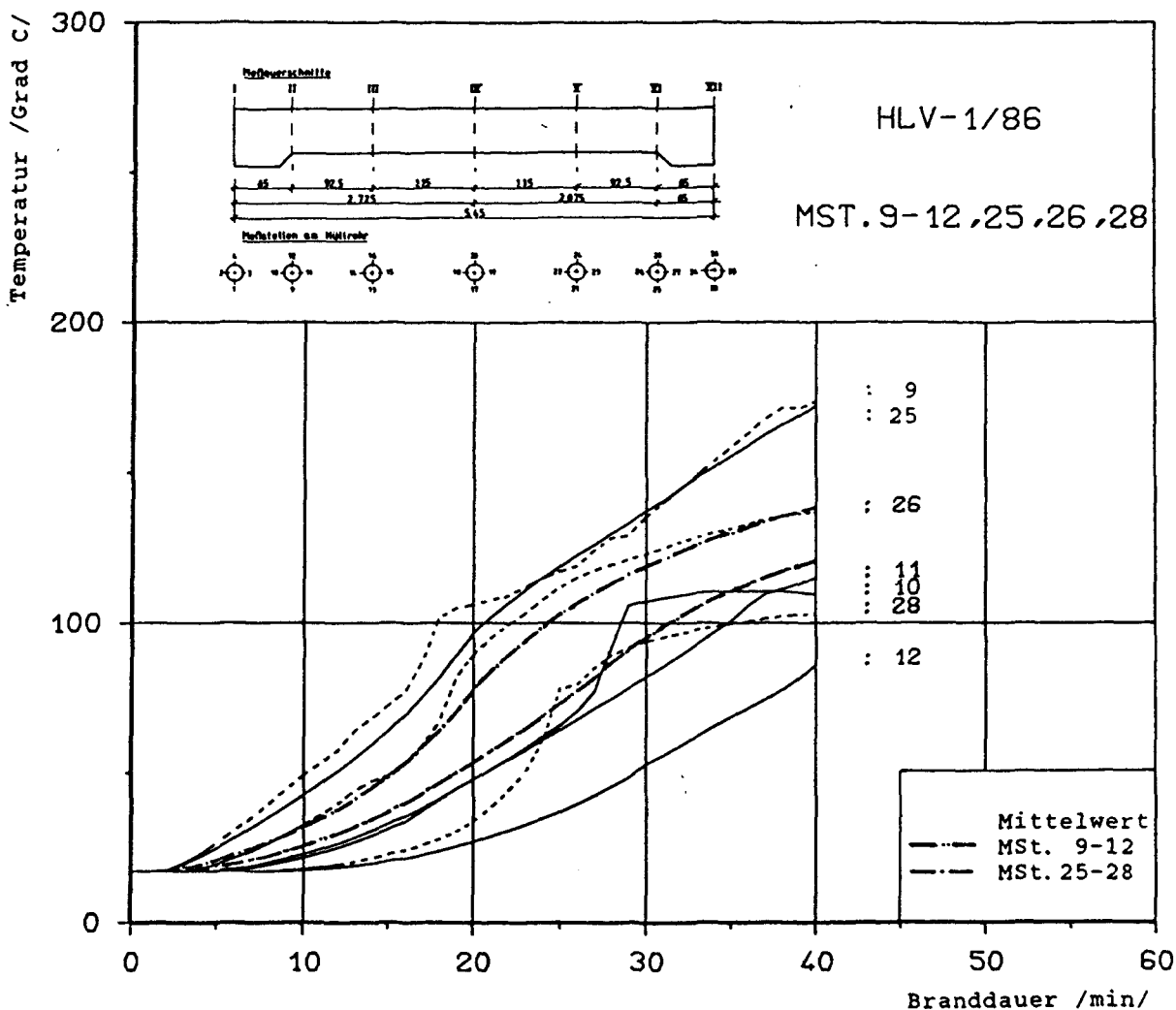


Bild 4.7: Temperaturentwicklung im Versuchskörper HLV-1/86, MQ II und VI

Aus den Temperaturverläufen der Bilder 4.6 und 4.7 bzw. 4.8 ergibt sich, daß in den drei Brandversuchen die Temperaturen im Verankerungsbereich der Spannglieder nicht höher als 150 °C gewesen waren.

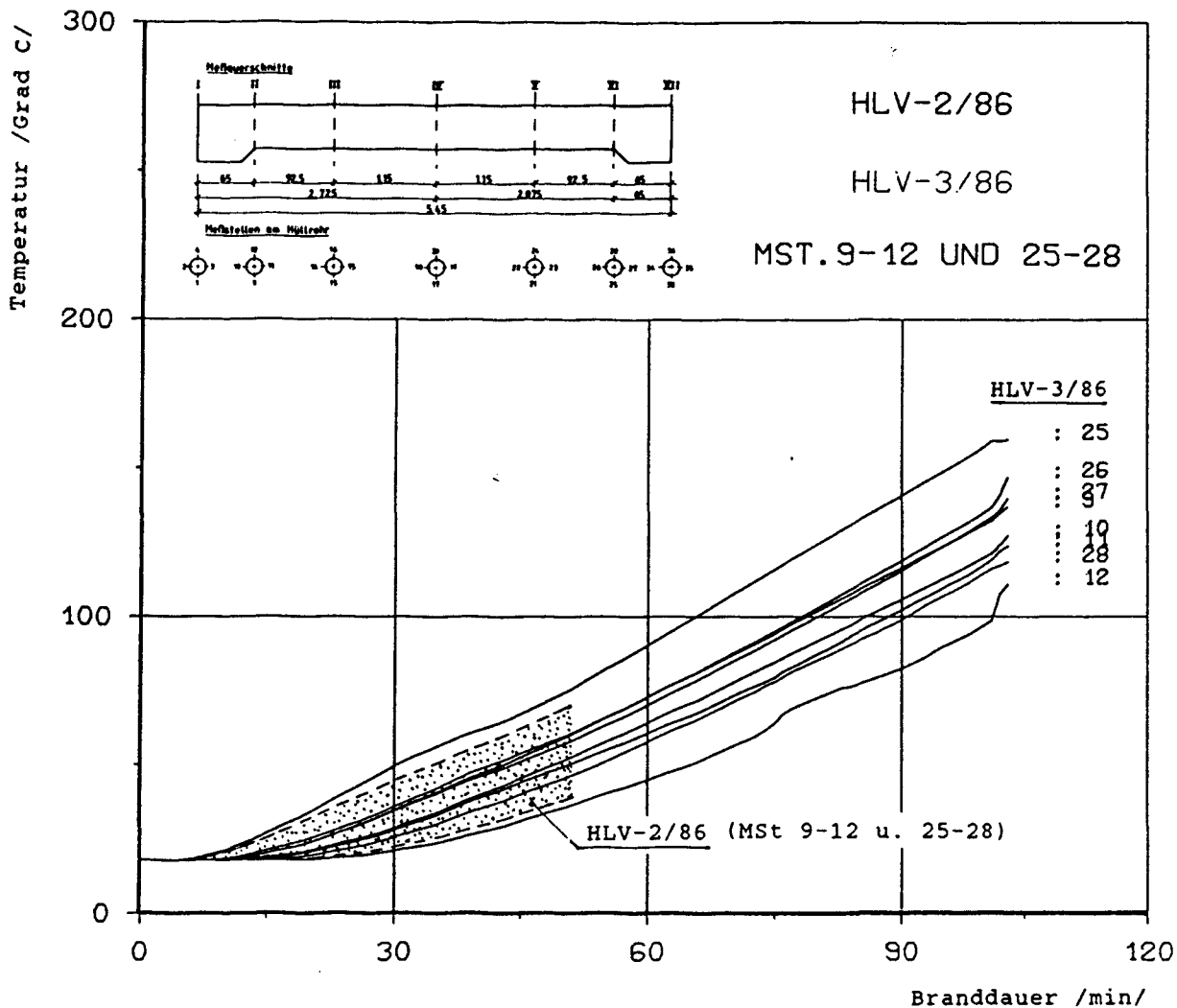


Bild 4.8: Temperaturentwicklung in den Versuchskörpern HLV-2/86 und HLV-3/86 in den Meßquerschnitten II und VI

Die Temperaturverläufe für die drei Meßquerschnitte im Feldbereich (MQ III, IV und V) sind im Bild 4.9 dargestellt. Für die drei durchgeführten Brandversuche werden dabei die gemittelten Werte aus den vier gemessenen Meßstellen gegenübergestellt. Die aufgetragenen Kurven basieren auf einer Mittelwertbildung im Zeitabstand von 5 Minuten. Die gemittelten Temperaturverläufe liegen in einem Streubereich von maximal 50 °C.

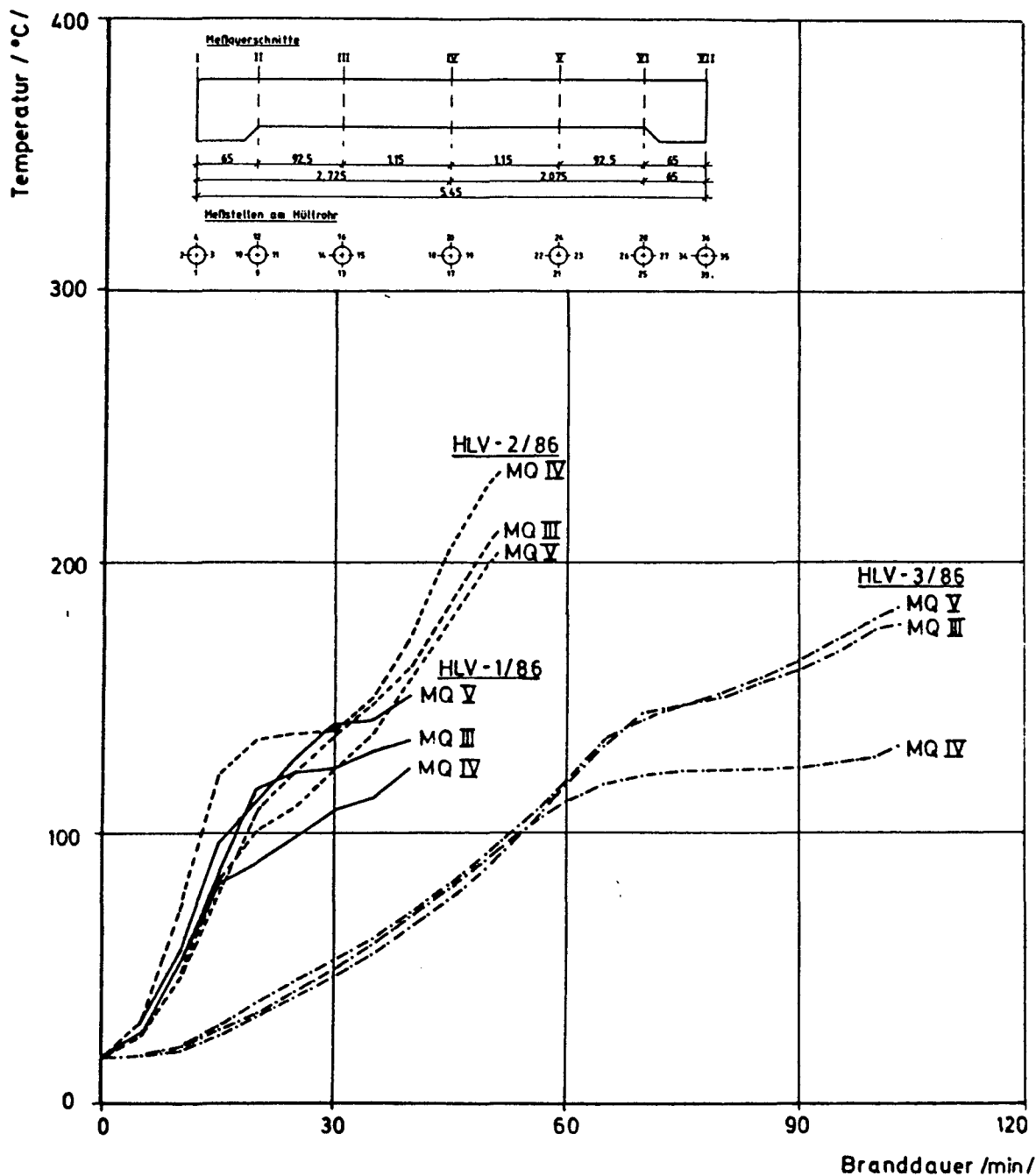


Bild 4.9: Gemittelte Temperaturverläufe in den Versuchskörpern HLV-1/86, HLV-2/86 und HLV-3/86 in den Meßquerschnitten III, IV und V

4.8.3 Versagen

Die drei Brandversuche wurden jeweils abgebrochen, nachdem der kritische Wert der Durchbiegegeschwindigkeit nach DIN 4102 Teil 2 deutlich überschritten worden war. Der Versuchsabbruch wurde durch scharfe, harte, kurze Knallgeräusche angekündigt, die bei Annäherung an das Versuchsende in kürzer werdenden Zeitabständen auftraten. Der Ausgangspunkt der Knallgeräusche im Versuchskörper konnte nicht genau lokalisiert werden. Für die im Abschnitt 4.6 aufgeführten Knallgeräusche sind im Bild 4.10 die zum Zeitpunkt des Knalls vorhandenen maximalen Temperaturen im Feldbereich der Versuchskörper zusammengestellt. Dabei steht in den beiden Zeilen unter der Branddauer jeweils in der ersten Zeile die gemittelte Temperatur entsprechend Bild 4.9, d.h. die Temperatur in der Achse des Spanngliedes, und in der zweiten Zeile die zugehörige Temperatur am unteren Scheitelpunkt des Hüllrohrs.

Versuchskörper	Branddauer und Temperaturen im Augenblick des Knallgeräusches				
HLV-1/86	Branddauer t_k /min/ :	28	36	40	
	mittl. Temp. T_k /°C/ :	136	143	151	
	max. Temp. T_k /°C/ :	233	245	263	
HLV-2/86	Branddauer t_k /min/ :	33		51	
	mittl. Temp. T_k /°C/ :	145		233	
	max. Temp. T_k /°C/ :	276		399	
HLV-3/86	Branddauer t_k /min/ :	97	101	103	
	mittl. Temp. T_k /°C/ :	174	181	183	
	max. Temp. T_k /°C/ :	201	211	216	

Bild 4.10: Zusammenstellung der Branddauern, der maximalen Temperaturen in der Spanngliedachse (gemittelte Temperaturen) und der maximalen Temperaturen am unteren Scheitelpunkt des Hüllrohrs im Augenblick der Knallgeräusche

Beim Vergleich der Versagenszeiten muß die im Umfang und in der Stärke unterschiedlich vorhandengewesene wärmeisolierende Bekleidung der Versuchsträger berücksichtigt werden. In den Versuche HLV-1/86 und HLV-2/86 war keine bzw. nur im Auflagerbereich eine wärmeisolierende Bekleidung angebracht; diese Versuchskörper versagten nach 40 bzw. 51 Minuten Branddauer. Annähernd die doppelte Branddauer (103 Minuten) wurde für den vollständig mit wärmeisolierender Bekleidung ummantelten Versuchskörper HLV-3/86 erreicht. Im Bild 4.11 sind die Versagenszeiten der Versuchskörper und der Umfang der vorhandenen wärmeisolierenden Bekleidung zusammengestellt.

Versuchskörper	Bekleidung (zusätzl. zu den Stirnflächen)	Versagenszeit /min/
HLV-1/86	keine	40
HLV-2/86	nur Auflagerbereiche	51
HLV-3/86	vollständig	103

Bild 4.11: Bekleidung und Versagenszeiten der Versuchskörper

Ergänzend zu den Bildern 4.7 bis 4.9 werden im Bild 4.12 die Versagenszeiten und die zugehörigen Temperaturen in der Spanngliedachse für die Meßquerschnitte im Feldbereich der Versuchskörper MQ II - MQ VI aufgelistet.

Versuchskörper	Versagenszeit /min/	Temperaturen in der Spanngliedachse /°C/ zum Vers.-zeitpunkt im Meßquerschnitt				
		II	III	IV	V	VI
HLV-1/86	40	121	135	124	151	138
HLV-2/86	51	54	211	233	204	59
HLV-3/86	103	125	177	132	183	141

Bild 4.13: Versagenszeiten und zugehörige Temperaturen in der Spanngliedachse

Im Bild 4.13 sind für den Versuchskörper HLV-1/86 die vertikalen Verformungen und die zugehörige Durchbiegegeschwindigkeit in Feldmitte dargestellt. Die kritische Durchbiegegeschwindigkeit von $l^2/(9000 \cdot h) = 0,56$ cm/min (0,094 mm/s) wurde in diesem Versuch (HLV-1/86) dreimal und in den Versuchen HLV-2/86 und HLV-3/86 jeweils einmal überschritten, bevor die Versuche durch Entlastung der Versuchskörper abgebrochen wurden.

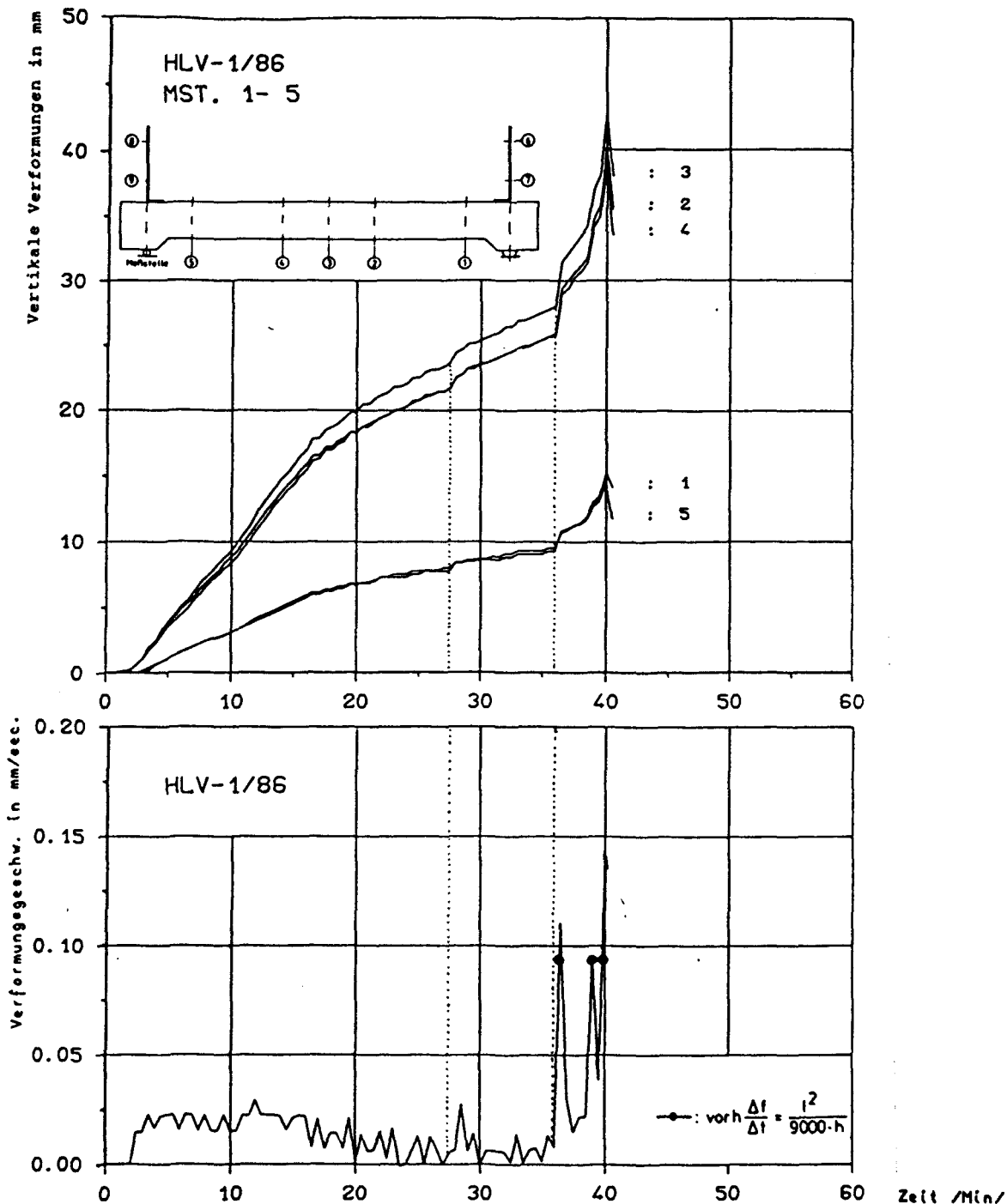


Bild 4.13: Vertikale Verformung und Durchbiegegeschwindigkeit für den Versuchskörper HLV-1/86

4.9 Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse lassen keine systematischen Unterschiede erkennen, die auf den verwendeten Auspreßmörtel in Form von Reaktionsharz und Zementmörtel zurückzuführen sind.

In den Brandversuchen HLV-1/86 und HLV-2/86 traten während der Brandbeanspruchung z.T. großflächige Betonabplatzungen auf. Aus Bild 4.3 geht hervor, daß die Betonabplatzungen z.B. im Brandversuch HLV-1/86 nicht im Bereich der Temperaturmeßquerschnitte lagen. Damit besteht die Möglichkeit, daß örtlich, im Bereich der Betonabplatzungen, deutlich höhere Temperaturen an der HLV-Bewehrung vorlagen, als durch die Temperaturmessungen angezeigt wurden. Ein Vergleich der im Feldbereich (Meßquerschnitt III, IV und V) zum Versagenszeitpunkt vorhandenen mittleren Temperaturen in der Spanngliedachse im Brandversuch HLV-1/86 mit den entsprechenden Temperaturen im Brandversuch HLV-3/86, bei dem infolge vollständiger wärmeisolierender Bekleidung keine Abplatzungen auftraten, zeigt Abweichungen in der Größe von ca. 40 °C (s. Bild 4.12). Damit erscheint es gerechtfertigt, nichtquantifizierbare Einflüsse infolge Betonabplatzungen hinsichtlich der Temperaturentwicklung am Spannglied bei der Diskussion der Versuchsergebnisse zu vernachlässigen.

Die außen am Hüllrohr gemessenen Temperaturen lassen keinen unmittelbaren Rückschluß auf die Temperaturen der einzelnen HLV-Elemente bzw. auf eine mittlere Temperatur im Gesamt-Spannglied, zu. Für mehrstäbige Spannglieder mit nachträglichem Verbund wird deshalb in /9/ empfohlen, als maßgebende Temperatur die Temperatur in der Achse des Spanngliedes festzusetzen. Auf die Temperaturentwicklung in diesem Punkt wird in /9/ die erforderliche Größe der Betondeckung zur Erzielung einer bestimmten Branddauer bezogen. Die Untersuchungen nach /9/ für Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund stimmen mit entsprechenden Untersuchungen nach /10/ für schlaff bewehrte und mit sofortigem Verbund vorgespannte Bauteile überein. In /10/ wurde festgestellt, daß die in der Praxis üblichen Bewehrungsmengen im Temperaturfeld örtliche Störungen hervorrufen, diese bei der Bemessung von Bauteilen für den Brandfall aber berücksichtigt werden, wenn die für eine bestimmte Branddauer erforderliche Betondeckung auf die Achse der Bewehrungsstäbe bezogen wird. Aufgrund der Ergebnisse in /9/ und /10/ wird im Abschnitt 5 eine maßgebende Temperatur für die Achse des Spanngliedes aus HLV-

Elementen empfohlen, wobei die Größe dieser Temperatur, z.B. zum Versagenszeitpunkt, durch den mittleren Wert der vier Temperaturen festgesetzt wird, die zum entsprechenden Zeitpunkt in jedem Meßquerschnitt aufgenommen wurden.

Die relativ geringe Verlängerung der Branddauer durch Wärmeisolierung im Auflagerbereich deutet darauf hin, daß das Versagen nicht vom Erwärmungsverhalten des Auflagerbereichs abhängt.

Aus der Verdoppelung der Branddauer für den Versuchsträger mit wärmeisolierender Bekleidung im Feldbereich ist eine deutliche Beeinflußung der Branddauer durch das Erwärmungsverhalten im Feldbereich zu erkennen.

5 Beurteilung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis

Die Versuchsergebnisse über das Brandverhalten von Bauteilen mit Hochleistungs-Verbund-Elementen (HLV-Elementen) sind für die Praxis vor allem hinsichtlich der brandschutztechnischen Bemessung dieser Bauteile interessant. Von besonderem Interesse ist dabei das Maß der Betondeckung für die HLV-Bewehrung, das erforderlich ist, um die Erwärmung der HLV-Bewehrung und damit ihre temperaturabhängige Festigkeitsreduzierung so lange zu verzögern, bis die vorgesehene Branddauer erreicht ist. Dafür können Angaben aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden, da bei den untersuchten Versuchskörpern kein Versagen durch Ausfall der Biegedruckzone, zerstörende Abplatzungen, Schubbruch, usw. auftrat, sondern das Versagen primär durch Ausfall der Bewehrungseinlagen in der vorgedrückten Zugzone erfolgte.

Allerdings kann das für Stahlbeton- und Spannbetonbauteile vorhandene Bemessungskonzept, das mit Hilfe der sog. kritischen Temperatur die brandschutztechnisch erforderlichen Entwurfdetails (Querschnittsgröße, Betondeckung der Bewehrung) festlegt, für die mit HLV-Bewehrung vorgespannten Bauteile nicht übernommen werden. Dafür ist das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen mit HLV-Bewehrung bzw. mit Betonstahl- oder Spannstahlbewehrung zu unterschiedlich.

Für Stahlbeton- und Spannbetonbauteile ist beim Erreichen der kritischen Temperatur die Biegetragfähigkeit der Bauteile erschöpft. Die temperatur- und spannungsabhängige Festigkeit der Bewehrung ist dann auf den Wert der im Bauteil -im Augenblick des Versagens- vorhandenen Spannung abgefallen. Die Größe der kritischen Temperatur hängt neben der anliegenden Spannung im wesentlichen von der Bewehrungssorte -Betonstahl (warmgewalzt oder kaltverformt), Spannstahl (vergütet oder kaltgezogen)- ab. Für einen kaltgezogenen Spannstahl mit einer Spannung von $\sigma = 0,55 \cdot f_{yk}$ beträgt z.B. die kritische Temperatur rd. 350 °C. Durch ausreichende Betondeckung wird die Erwärmung der Bewehrung auf den Wert der kritischen Temperatur so lange verzögert, bis die vorgesehenen Branddauer erreicht ist.

Die Versuchsergebnisse der Bauteile, die mit HLV-Bewehrung vorgespannt waren, scheinen darauf hinzudeuten, daß die Verzögerung der Erwärmung auf

den für HLV-Bewehrung maßgebenden Wert der kritischen Temperatur nicht ausreicht, um die angestrebte Branddauer zu erreichen. Aus den Untersuchungen nach /11/ lassen sich kritische Temperaturen für HLV- Elemente ableiten. Für Spannungen im HLV-Element von $\sigma = 750 \text{ N/mm}^2$, d.h. vergleichbar der Spannung, mit der die Versuchskörper vorgespannt waren, ergeben sich je nach Erwärmungsgeschwindigkeit kritische Temperaturen von $415 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. In den Brandversuchen HLV-1/86 und HLV-3/86 wurden zum Versagenszeitpunkt im Bereich der HLV-Elemente ca. $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ niedrigere maximale Temperaturen gemessen. Nur im Brandversuch HLV-2/86 wurden zum Versagenszeitpunkt als maximale Temperatur annähernd der Wert der kritischen Temperatur gemessen. Dabei muß aber berücksichtigt werden, daß in allen Versuchskörpern die Temperaturmeßstellen außen am Hüllrohr befestigt waren und so die im Hüllrohr vorhandene, durch den in der Regel relativ feuchten Auspreßmörtel verursachte Temperaturverzögerung nicht erfaßten.

Es hat den Anschein, daß die temperaturabhängige Festigkeitsreduzierung der HLV-Bewehrung überlagert wird von tragfähigkeitsmindernden Effekten, die in den Versuchen im Zusammenhang mit dem Auftreten der scharfen Knallgeräusche beobachtet wurden. Die in den Brandversuchen registrierten deutlichen Knallgeräusche, die bei Annäherung an das Versuchsende in kürzer werdenden Abständen auftraten, dürften mit partiellen Brüchen einzelner HLV-Elemente im Zusammenhang stehen. Die im Untersuchungsprogramm erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Knallgeräusche mit dem Überschreiten einer bestimmten Temperatur in der HLV-Bewehrung in Zusammenhang stehen und daß das Versagen des Bauteils nach Auftreten der Knallgeräusche eingeleitet wird.

Aufgrund der Versuchsbeobachtungen werden für die brandschutztechnische Bemessung folgende Forderungen erhoben:

1. Die maximale Temperatur der HLV-Bewehrung muß auf einen Wert begrenzt werden, der das Auftreten von Knallgeräuschen nach Möglichkeit ausschließt.
2. Die angestrebte Branddauer muß mit dem Zeitpunkt des Auftretens des ersten Knallgeräusches annähernd gleichgesetzt werden.
3. Die mittlere Temperatur im HLV-Spannglied, d.h. die Temperatur in der Spanngliedachse, muß zum Versagenszeitpunkt niedriger oder gleich sein, wie die in den Versuchen festgestellte vergleichbare Temperatur.

Die Forderungen 1 - 3 werden erfüllt, wenn die Betondeckung für das HLV-Spannglied so festgelegt wird, daß zur angestrebten Branddauer

- die maximale Temperatur am unteren Scheitelpunkt des Hüllrohrs nicht über 200 °C und
- die Temperatur in der Spanngliedachse nicht über 100 °C

ansteigt.

Die zur Einhaltung dieser Temperaturen erforderliche Betondeckung ist entsprechend DIN 4102 Teil 4 /12/ als Mindestachsabstand zu bestimmen, wobei der Mindestachsabstand auf den unteren Scheitelpunkt des Hüllrohrs ($\max T \leq 200 \text{ °C}$) bzw. auf die Achse des Spannglieds ($\max T \leq 100 \text{ °C}$) zu beziehen ist. Mit den in DIN 4102 Teil 4 angegebenen Tabellen, z.B. Tabelle 3 und 5, läßt sich die erforderliche Betondeckung für verschiedene Feuerwiderstandsdauern gezielt bestimmen, wobei als Richtwert immer die angegebenen maximalen Temperaturen ($\max T \leq 200 \text{ °C}$ bzw. $\max T \leq 100 \text{ °C}$) einzuhalten sind.

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ist es nicht möglich, eventuelle Vergrößerungen oder Verkleinerungen der angegebenen maximalen Temperaturen für den Fall abzuleiten, daß die Ausnutzung der Spannglieder deutlich von der in den Versuchen vorhandenen Ausnutzung mit $\sigma \approx 0,5 \cdot \beta_z$ (β_z : Rechenwert der Festigkeit) abweicht. Damit wird der Unterschied der angegebenen maximalen Temperaturen zur spannungsabhängig formulierten kritischen Temperatur nach DIN 4102 deutlich.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Versuchsprogramm wurden drei statisch bestimmt gelagerte Versuchskörper (Balken) mit Vorspannung mit nachträglichem Verbund unter Brandbeanspruchung nach DIN 4102 untersucht. Die Versuchskörper waren mit jeweils einem Spannglied aus acht HLV-Elementen vorgespannt. Das Spannglied lag in einem Hüllrohr, das bei zwei Versuchskörpern mit Reaktionsharz und bei einem Versuchskörper mit Zementmörtel ausgepreßt war.

Die Ergebnisse der Brandversuche sind in Form von Temperatur-Zeit- und Verformungs-Zeit-Diagrammen sowie in Tabellen dargestellt. Daraus geht hervor, daß das Versagen der Bauteile nach Überschreiten einer bestimmten Temperatur in der HLV-Bewehrung, verbunden mit lauten Knallgeräuschen, relativ plötzlich stattfindet.

Aus den Versuchsbeobachtungen wurden Vorschläge für die erforderliche Betondeckung der HLV-Bewehrung abgeleitet, deren Einhaltung das Erreichen einer vorgesehenen Branddauer ermöglicht.

Die vorgenommene Beurteilung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf eine Anwendung in der Praxis gilt nur für solche Bauteile, die mit den im vorliegenden Forschungsbericht beschriebenen Bauteilen vergleichbar sind. D.h., für statisch bestimmt gelagerte Bauteile, die mit Spanngliedern aus HLV-Elementen mit nachträglichem Verbund bewehrt sind, bei denen die HLV-Elemente mit $\sigma \approx 0,5 \cdot \beta_z$ (β_z : Rechenwert der Festigkeit) vorgespannt sind, und die mit annähernd der gleichen statischen Belastung, wie im Forschungsbericht angegeben, beansprucht sind.

7 Literatur

- /1/ Gropp, M.: Hochleistungs-Verbundstäbe als Spannglieder im Massivbau - Tragverhalten bei Vorspannung ohne Verbund. Beitrag zum 20. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, März 1988.
- /2/ Gunschmann, W.: Glas als Baustoff für die Bewehrung von vorgespannten Betonbauteilen. Glas-Email-Keramo-Technik 8/1951.
- /3/ Rubinsky, I.A.; Rubinsky, A.: Preliminary Investigation of the Use of Fibre-Glass for Prestressed Concrete. Magazine of Concrete Research, 1954.
- /4/ Somes, N.F.: Resin-bonded Glass-Fibre Tendons for Prestressed Concrete. Magazine of Concrete Research, 1963.
- /5/ Kajfasz, S.: Some tests on Beams Prestressed by Fibre-Glass Cords. Magazine of Concrete Research, Vol. 12., No. 35, 1960.
- /6/ Hochleistungs-Verbundelemente (HLV-Elemente): Entwicklung und Erprobung kunstharzgebundener Glasfaserbewehrung und ihrer Verankerung für die Aufnahme hoher Zugkräfte im Beton- und Erdbau. Förderungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung- und Technologie, KT 7809.
- /7/ Kepp, B.: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, 1984.
- /8/ Weiser, M.: Erste mit Glasfaser-Spanngliedern vorgespannte Betonbrücke. Beton- und Stahlbetonbau 2/1983.
- /9/ Schneider, U.; Dreyer, R.: Untersuchung über die Feuerwiderstandsdauer von Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund bei Brandbeanspruchung. Unveröffentlichter Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971.

- /10/ Kordina, K.; Ehm, H.; Postel, R.v.: Experimentelle Untersuchungen über Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 230 Teil 1, 1975.
- /11/ Rehm, G.; Franke, L.; Herrmann, G.; Schlottke, B.: Ermittlung der Materialkennwerte von HLV-Elementen unter thermischer Beanspruchung. Teibericht zum Erforschung- und Entwicklungsvorhaben "Ermittlung der Kennwerte für Material- und Verbundverhalten der HLV-Elemente sowie Prüfung und Optimierung verschiedener Konstruktionselemente für die Spannkraftüberleitung aus HLV-Bewehrungssträngen bei der Spannbettvorspannung". Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, April 1982.
- /12/ DIN 4102 Teil 4 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile", März 1981.

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 1: Vertikale Verformungen, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 2: Vertikale Verformungen, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 3: Vertikale Verformungen, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 4: Horizontale Verformungen, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 5: Horizontale Verformungen, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 6: Horizontale Verformungen, Versuchskörper HLV-3/86

- Anlage 7: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt III, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 8: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 9: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt V, Versuchskörper HLV-1/86

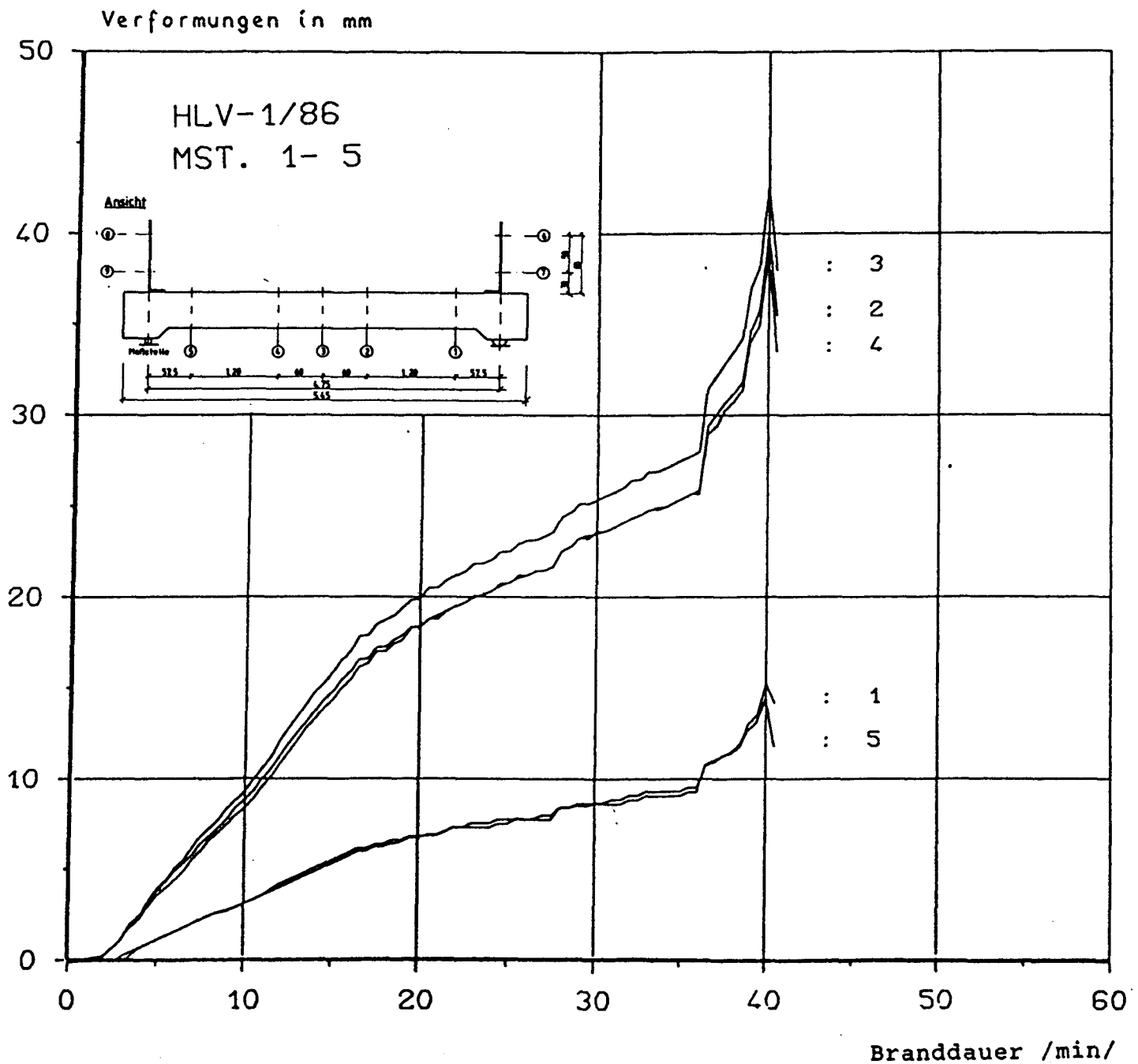
- Anlage 10: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt III, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 11: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 12: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt V, Versuchskörper HLV-2/86

- Anlage 13: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt III, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 14: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 15: Temperaturentwicklung an der schlaffen Bewehrung,
Meßquerschnitt V, Versuchskörper HLV-3/86

- Anlage 16: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente,
Meßquerschnitt I und VII, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 17: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente,
Meßquerschnitt II und VI, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 18: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente,
Meßquerschnitt III und V, Versuchskörper HLV-1/86
- Anlage 19: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente,
Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-1/86

- Anlage 20: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt I und VII, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 21: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt II und VI, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 22: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt III und V, Versuchskörper HLV-2/86
- Anlage 23: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-2/86
-
- Anlage 24: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt I und VII, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 25: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt II und VI, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 26: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt III und V, Versuchskörper HLV-3/86
- Anlage 27: Temperaturentwicklung am Hüllrohr der HLV-Elemente, Meßquerschnitt IV, Versuchskörper HLV-3/86
-
- Anlage 28: Brandraumtemperaturen im Versuch HLV-1/86
- Anlage 29: Brandraumtemperaturen im Versuch HLV-3/86

Vertikale Verformungen



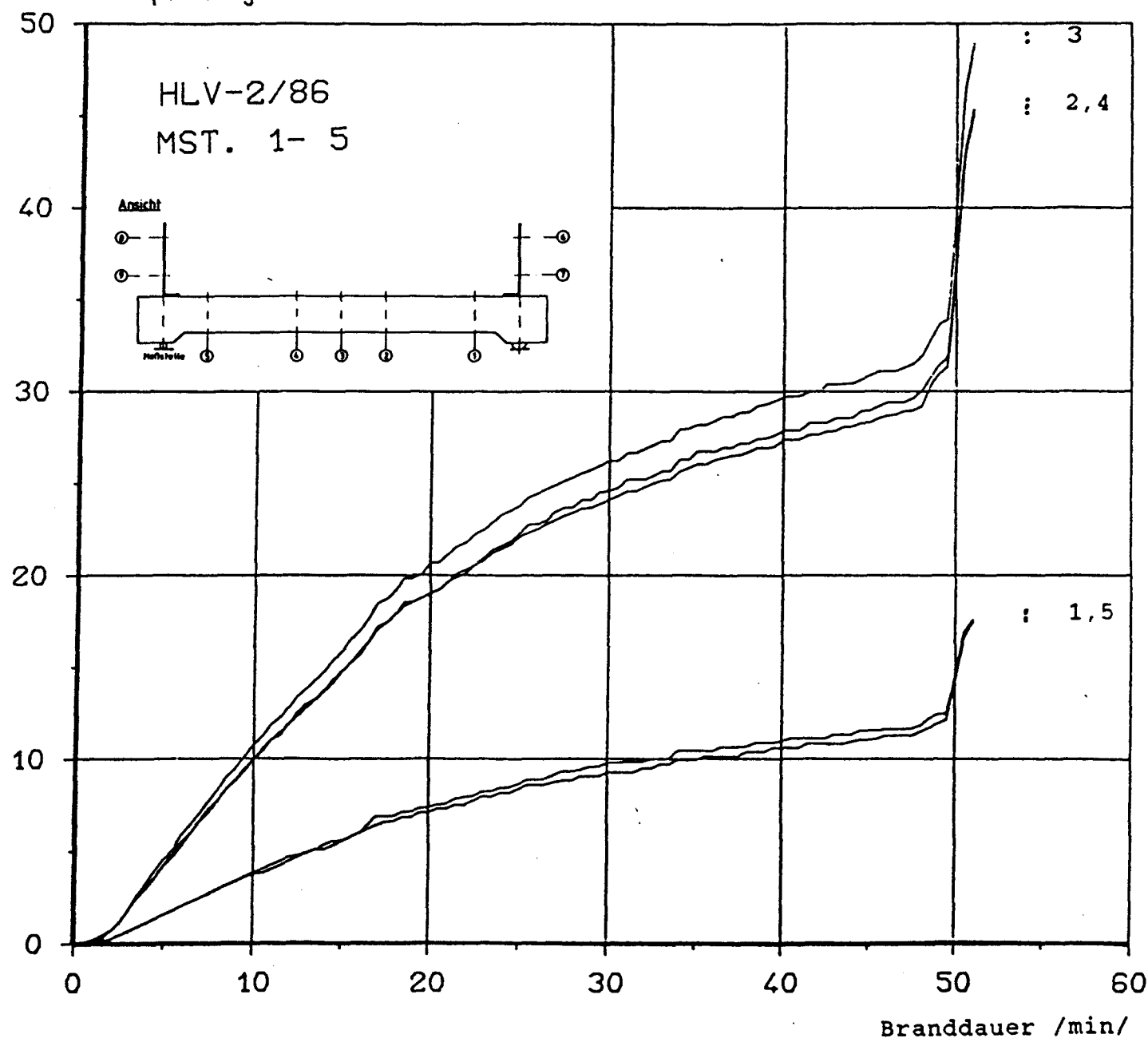
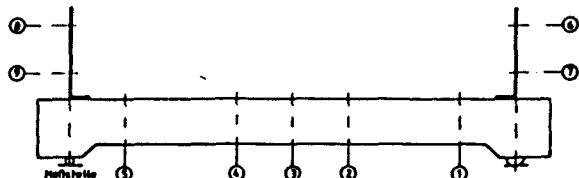
Anlage 1

Vertikale Verformungen

Verformungen in mm

HLV-2/86
MST. 1- 5

Ansicht



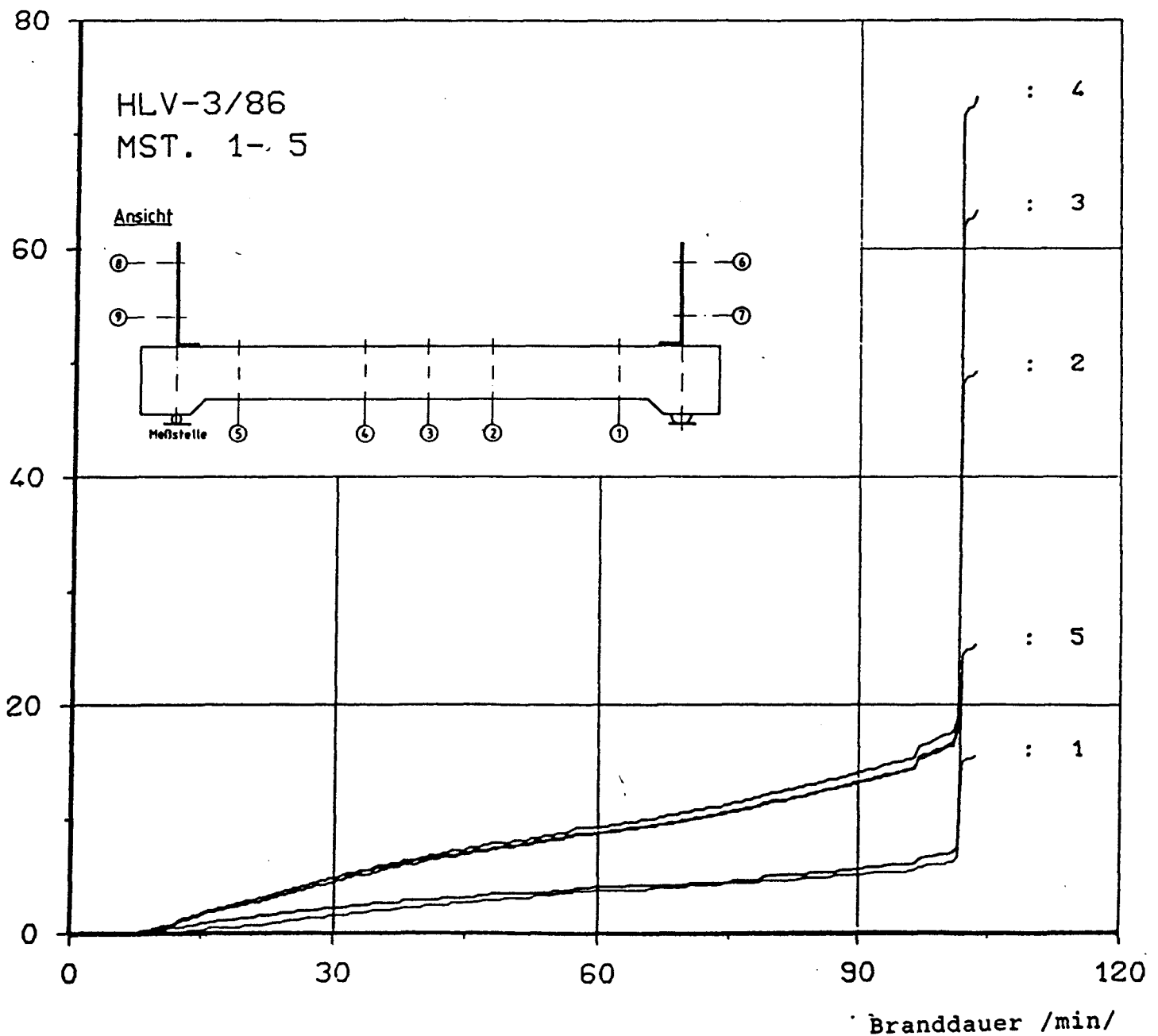
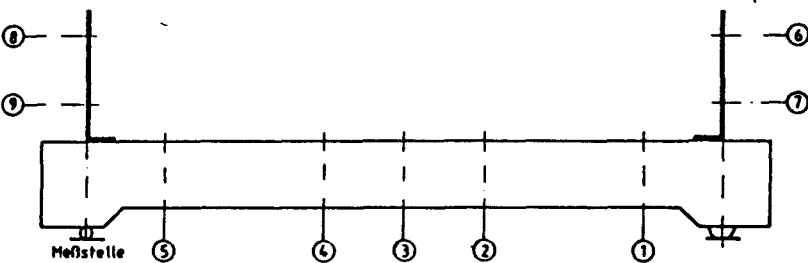
Anlage 2

Vertikale Verformungen

VERFORMUNGEN IN MM

HLV-3/86
MST. 1-5

Ansicht



Anlage 3

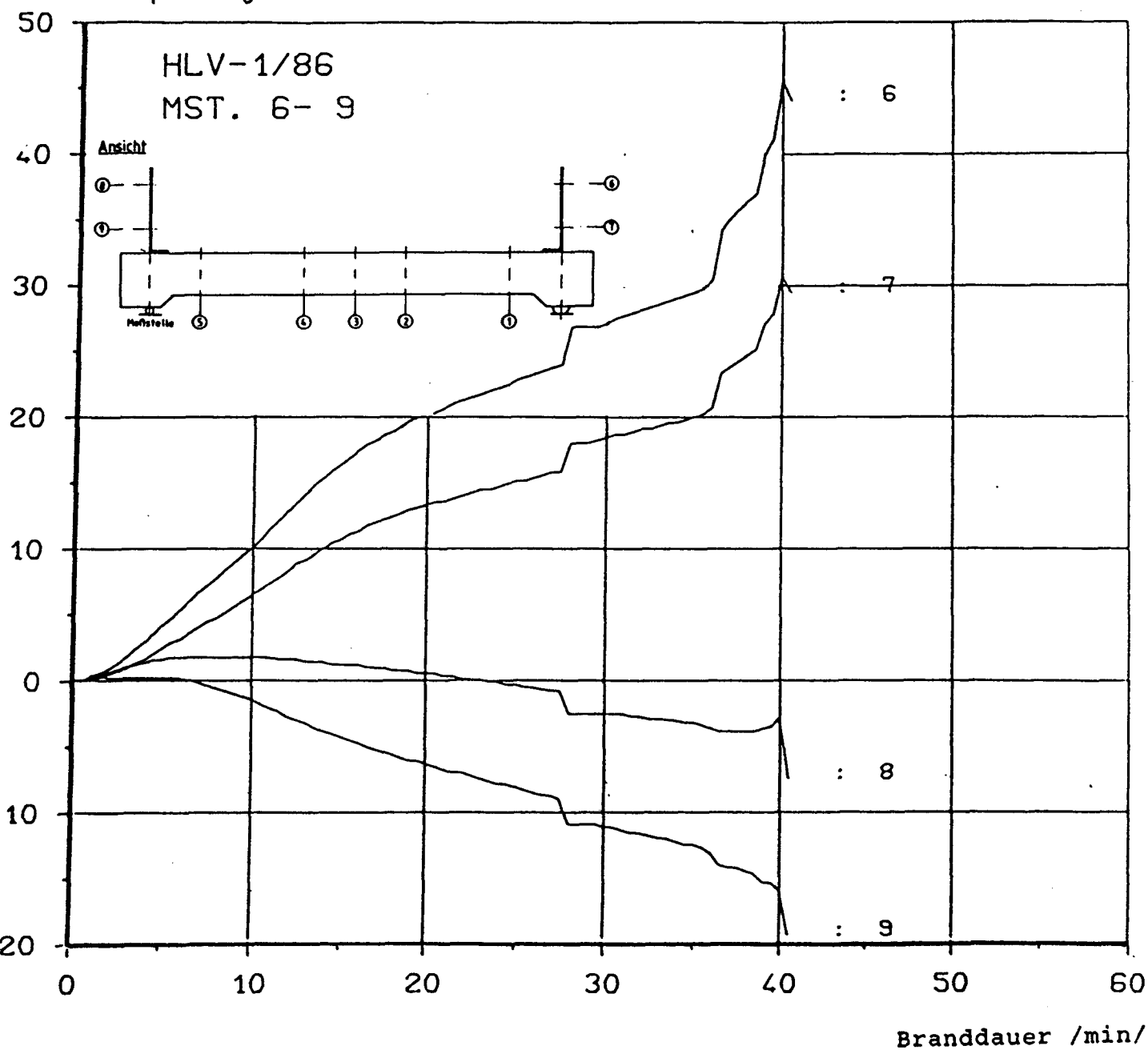
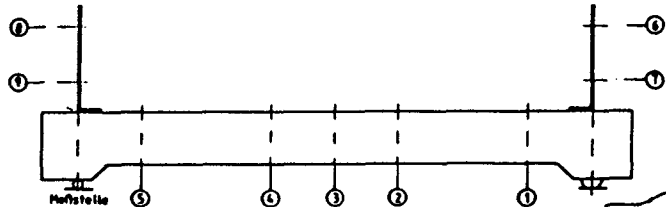
Horizontale Verformungen

Verformungen in mm

HLV-1/86

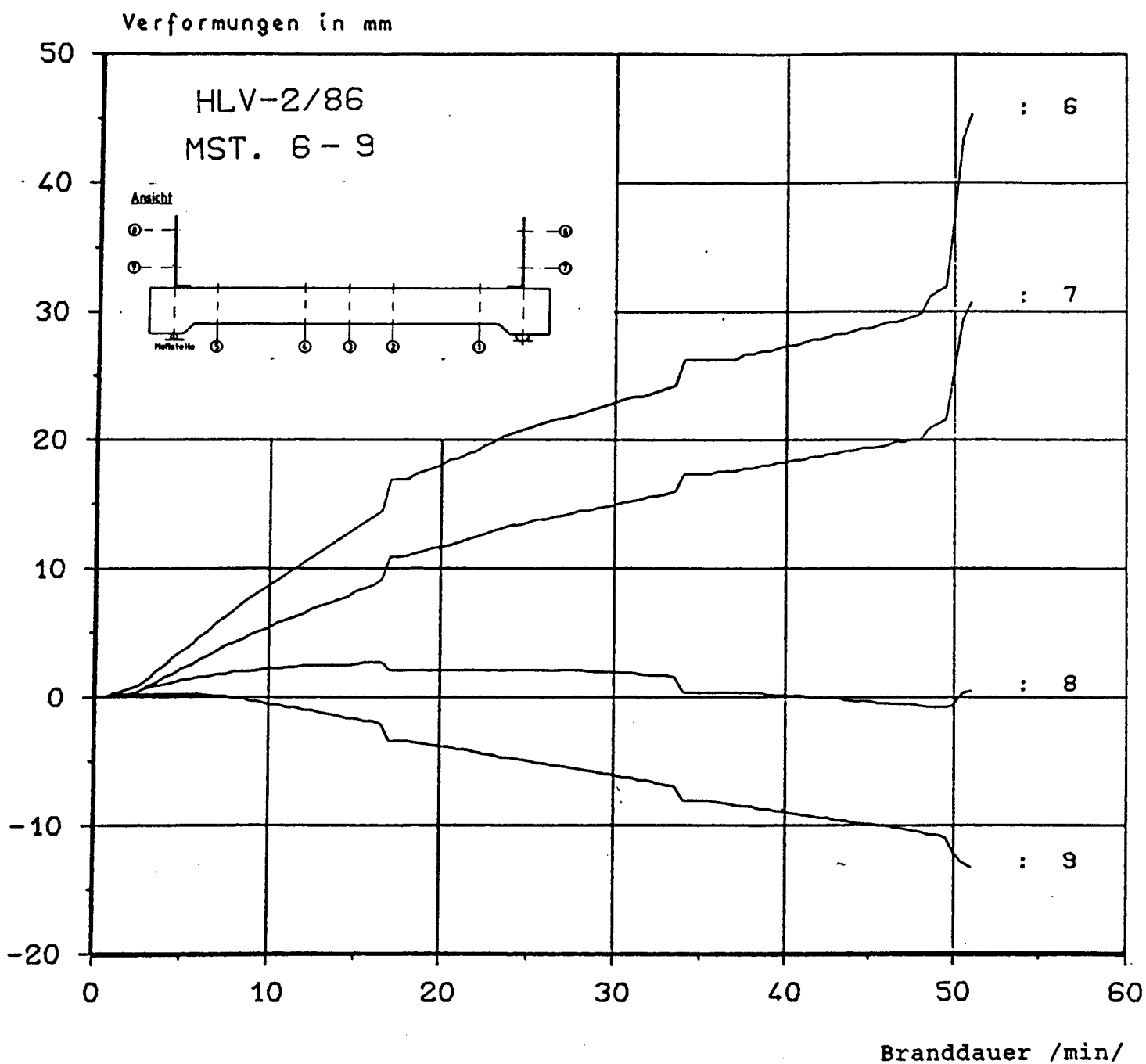
MST. 6- 9

Ansicht



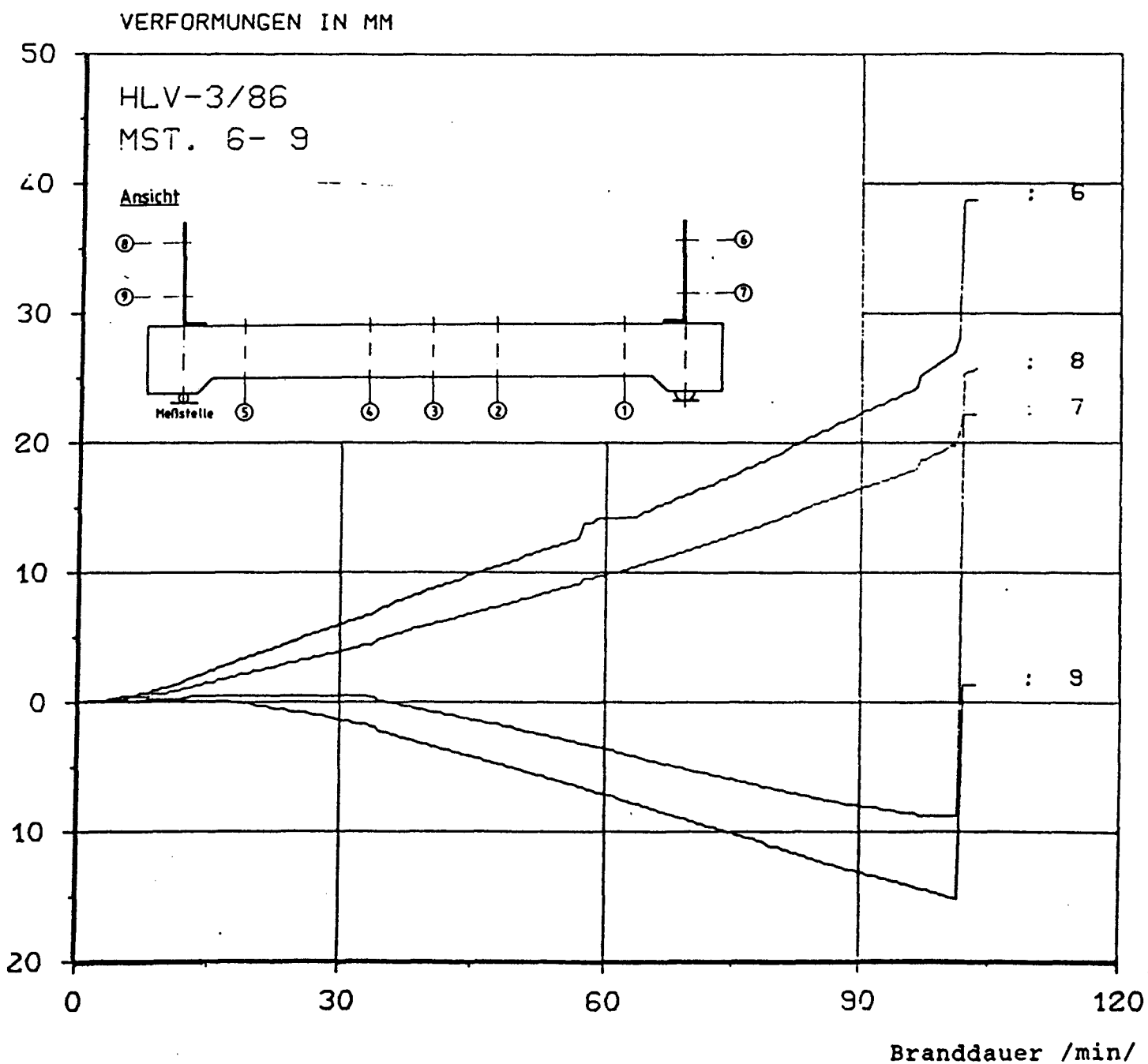
Anlage 4

Horizontale Verformungen



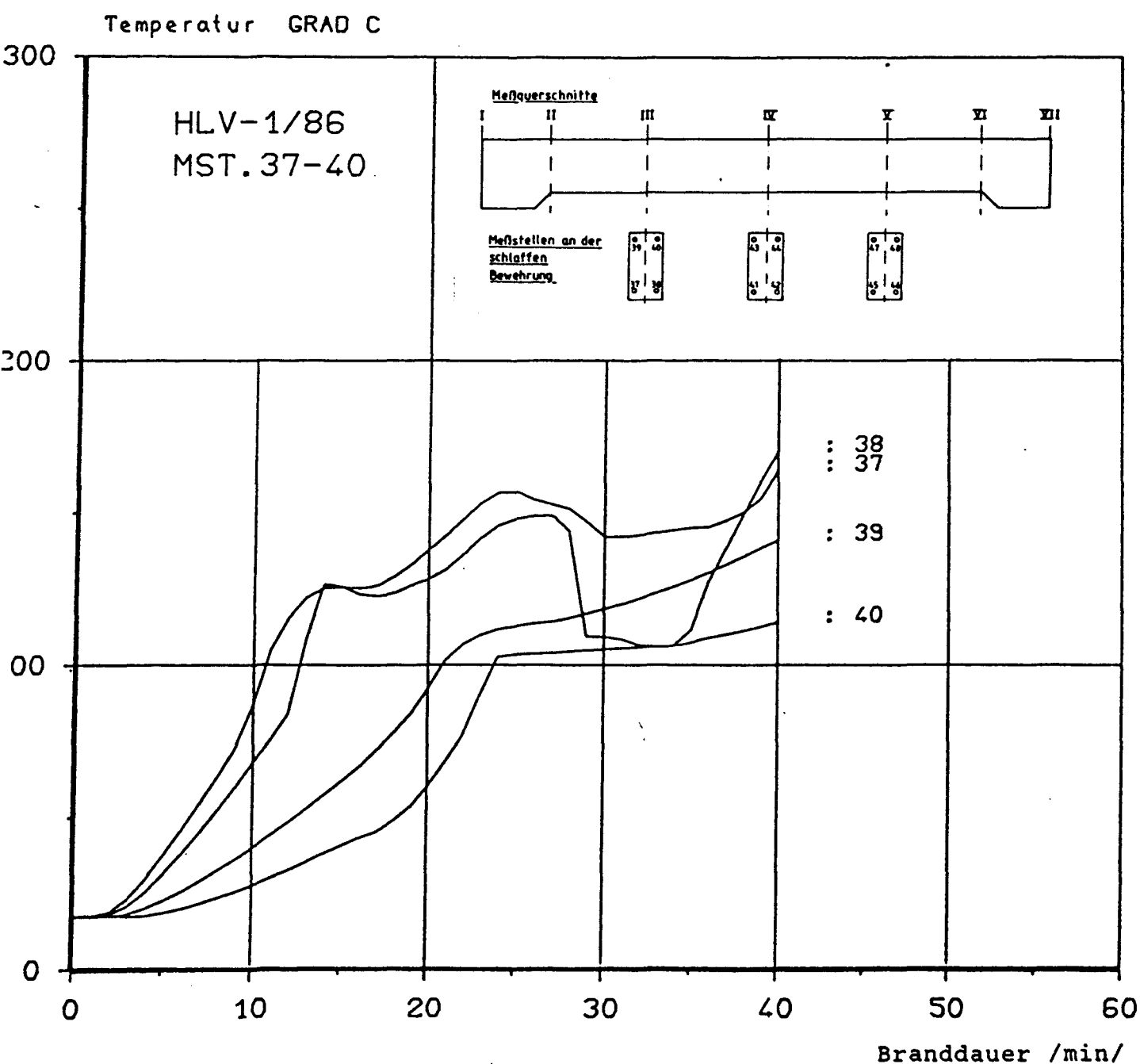
Anlage 5

Horizontale Verformungen



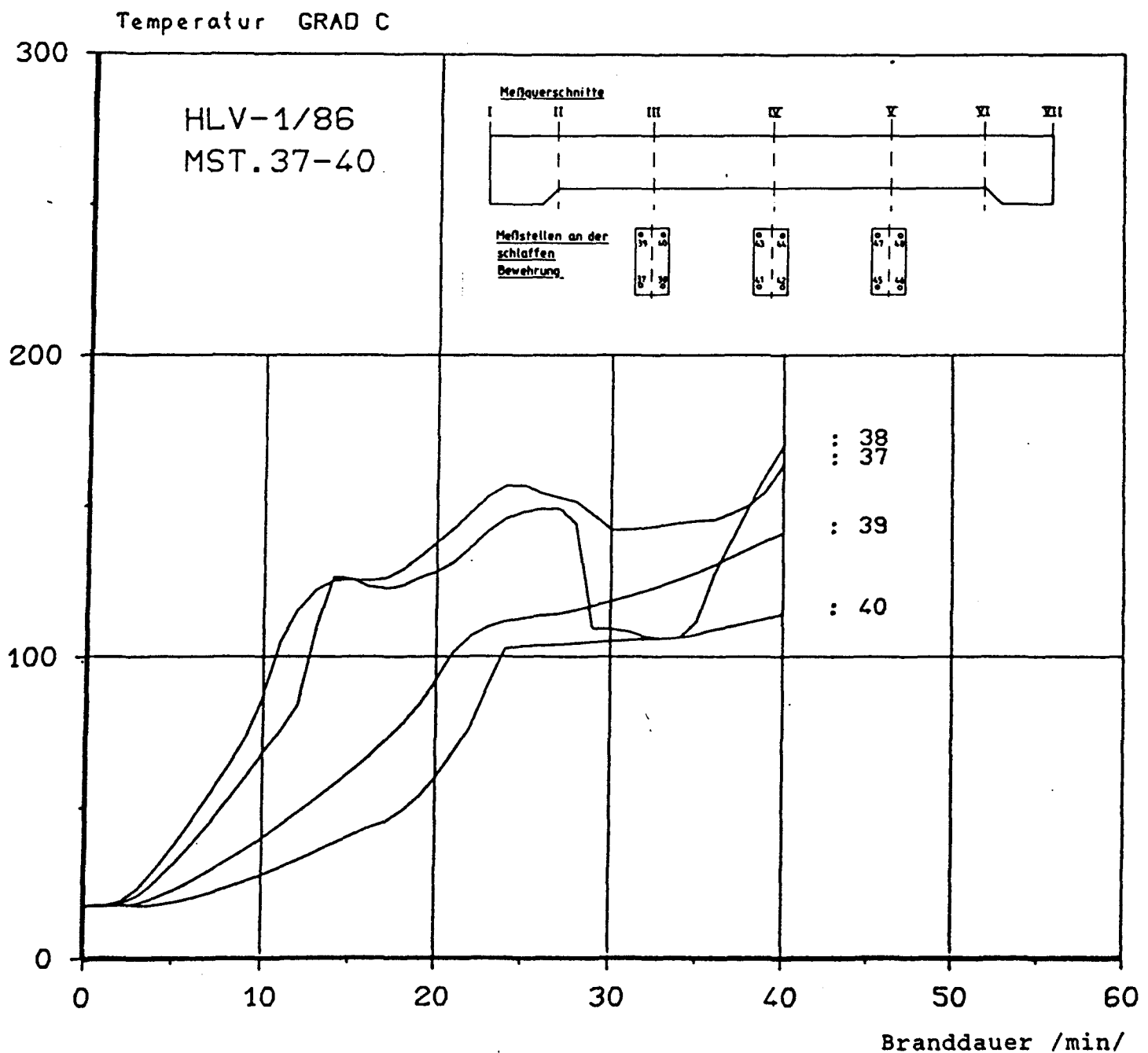
Anlage 6

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



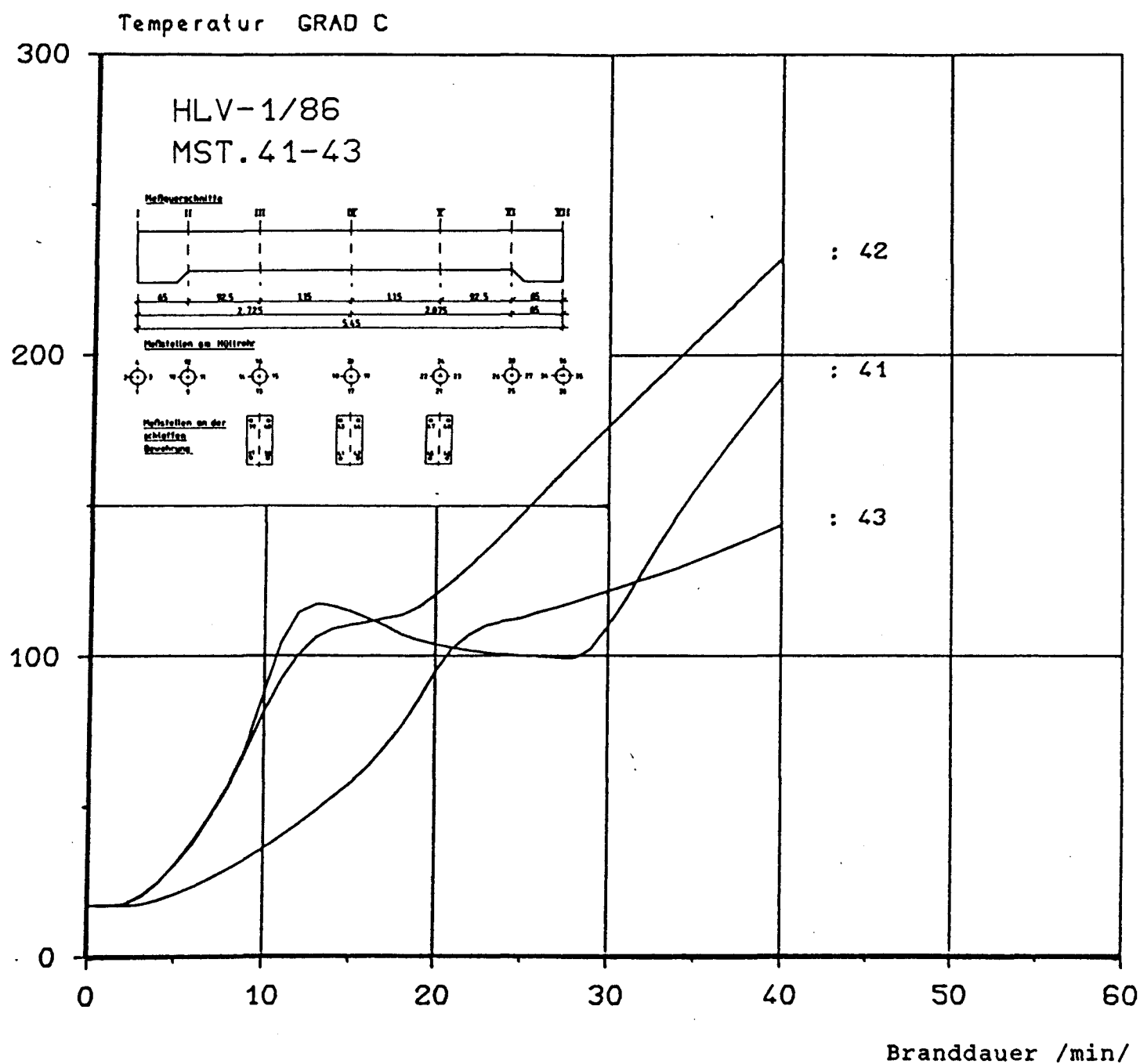
Anlage 7

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



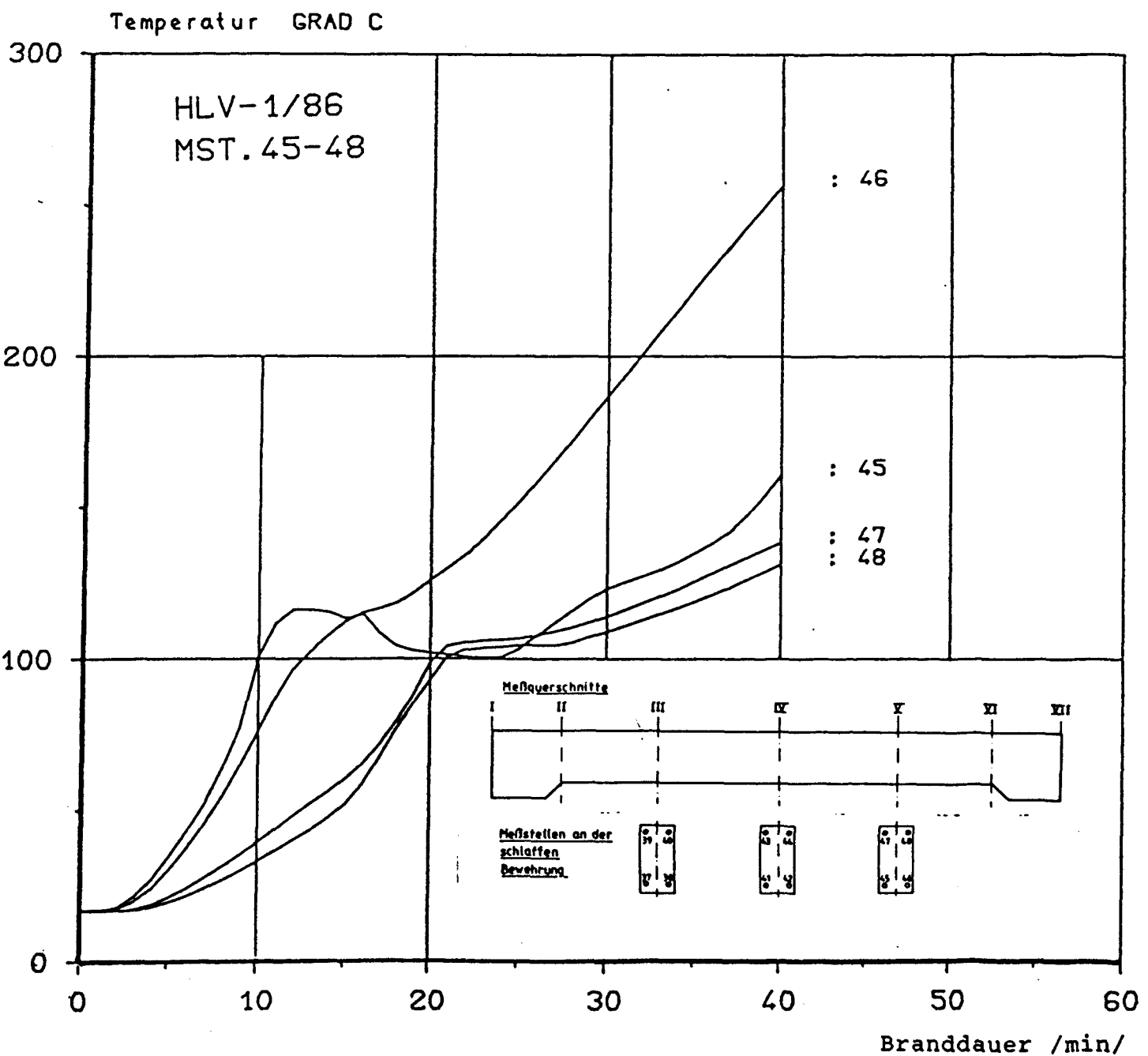
Anlage 7

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



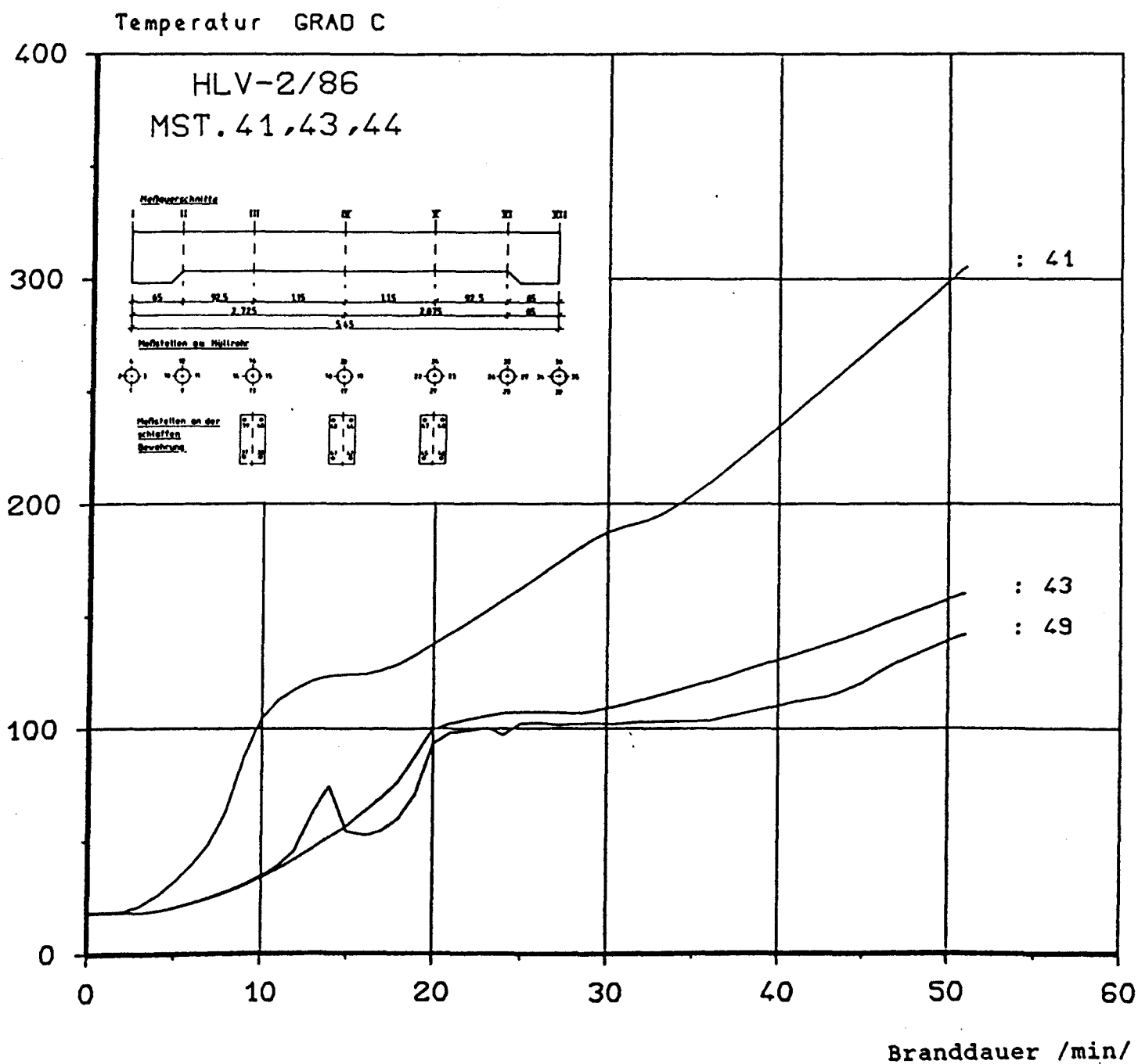
Anlage 8

Temperaturen der schlaffen Bewehrung

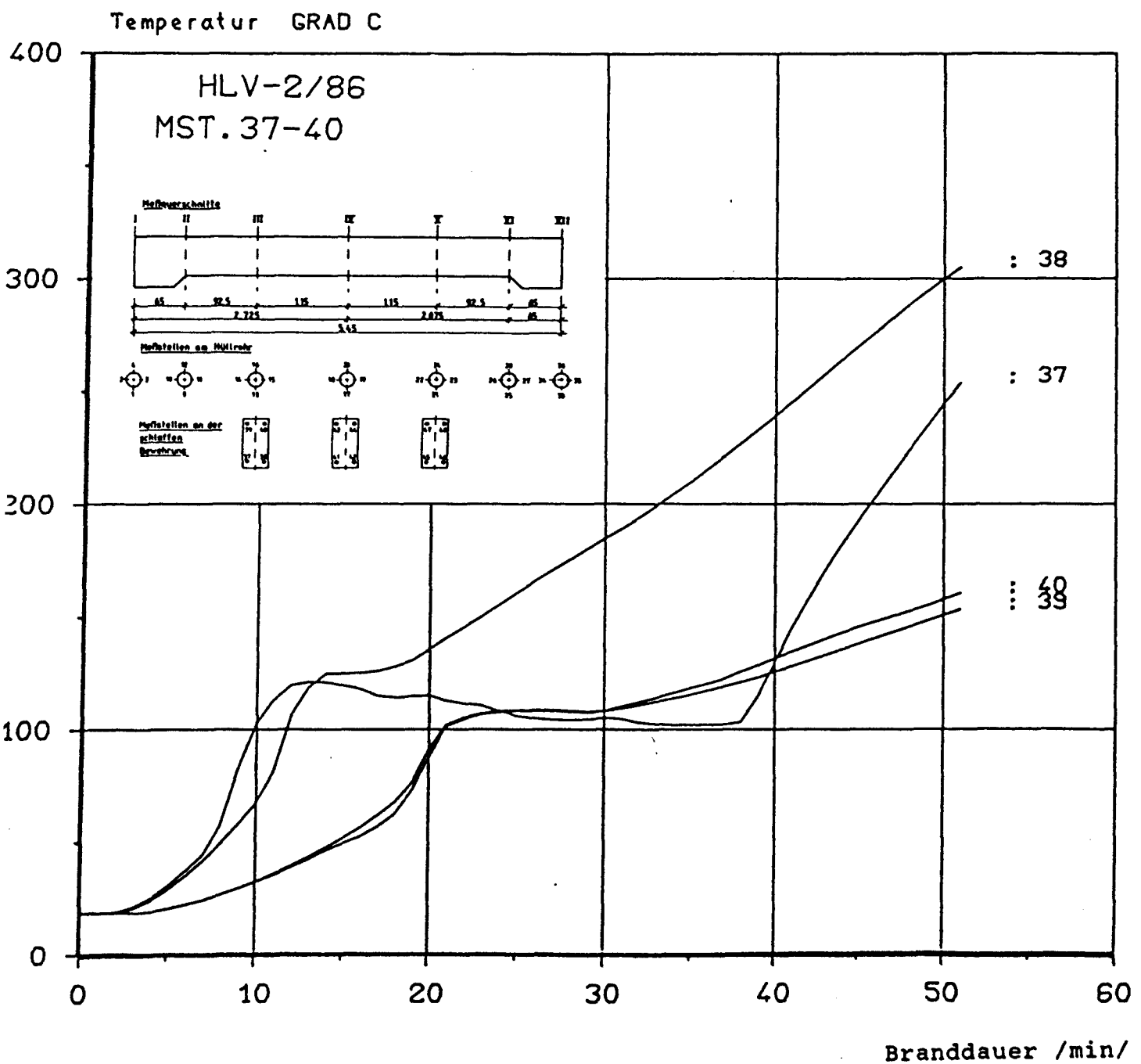


Anlage 9

Temperaturen der schlaffen Bewehrung

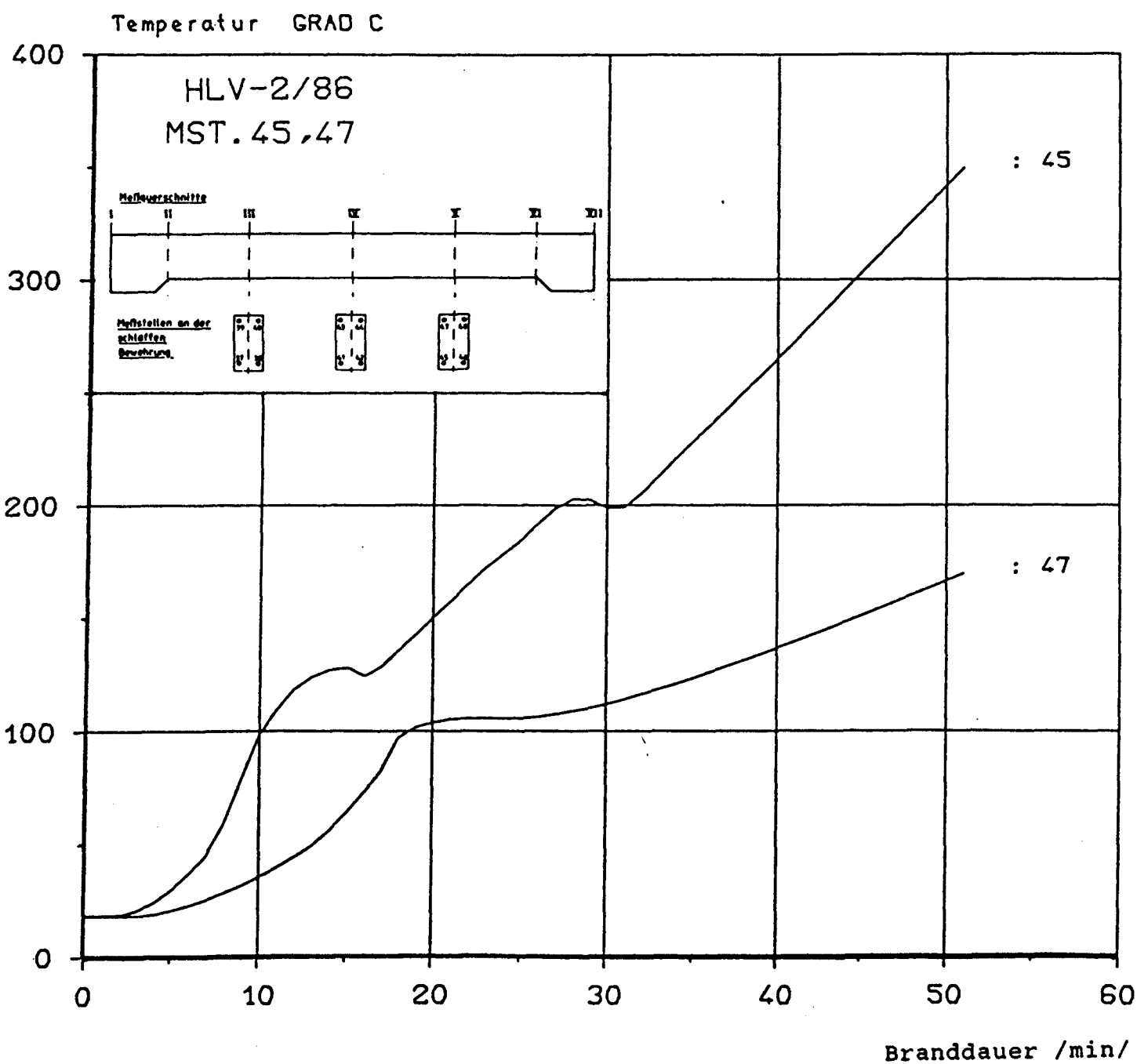


Temperaturen der schlaffen Bewehrung



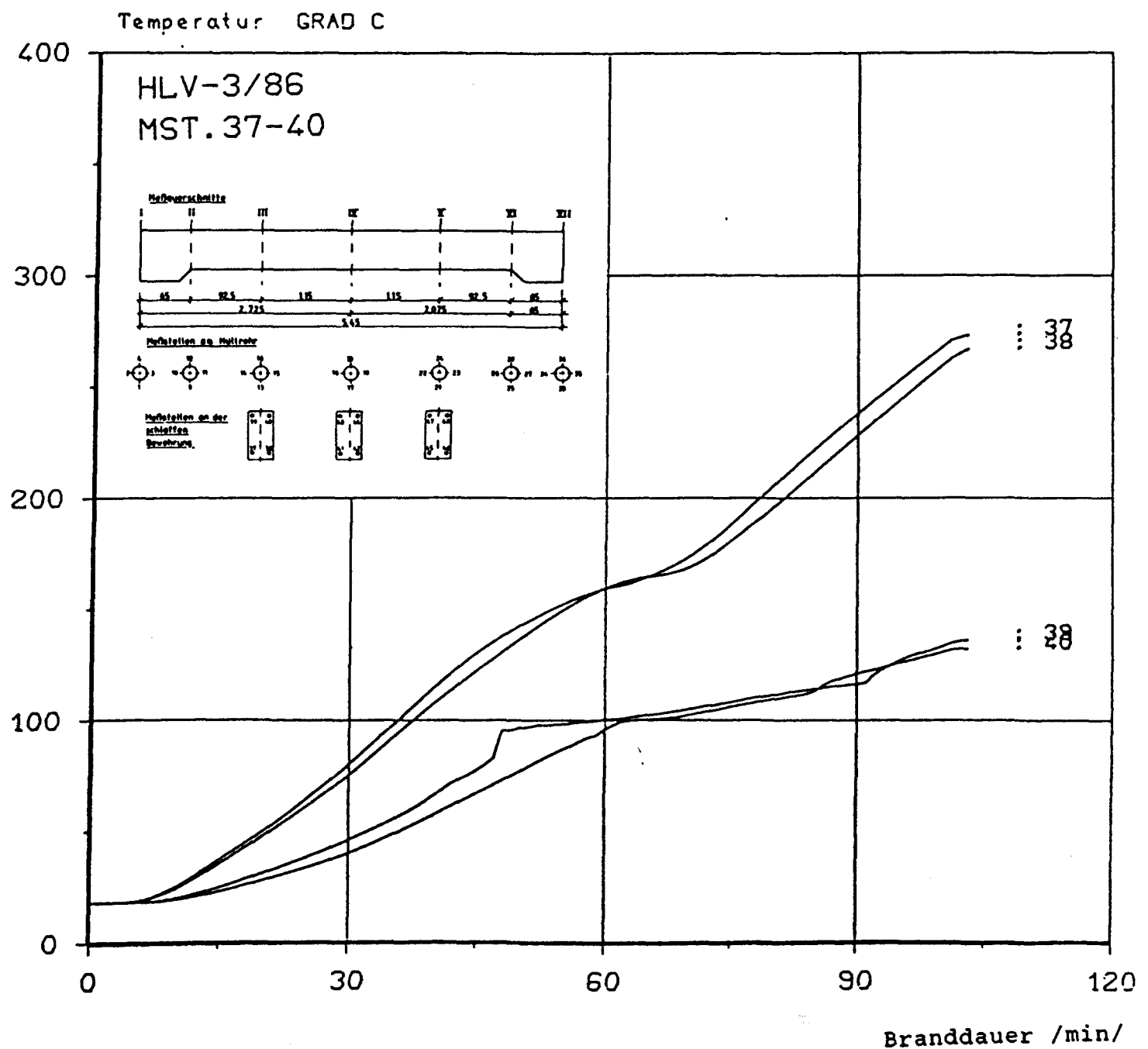
Anlage 11

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



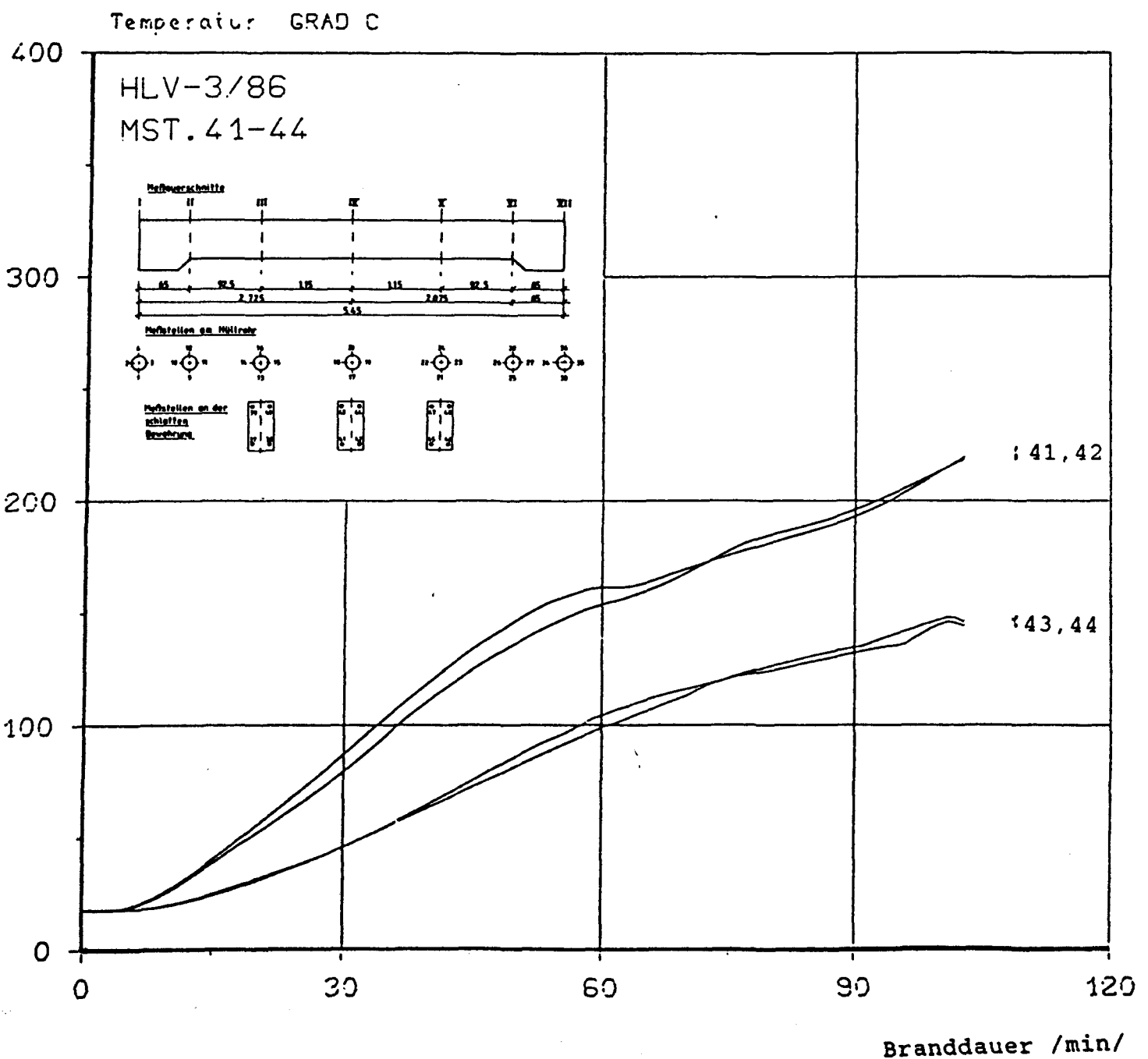
Anlage 12

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



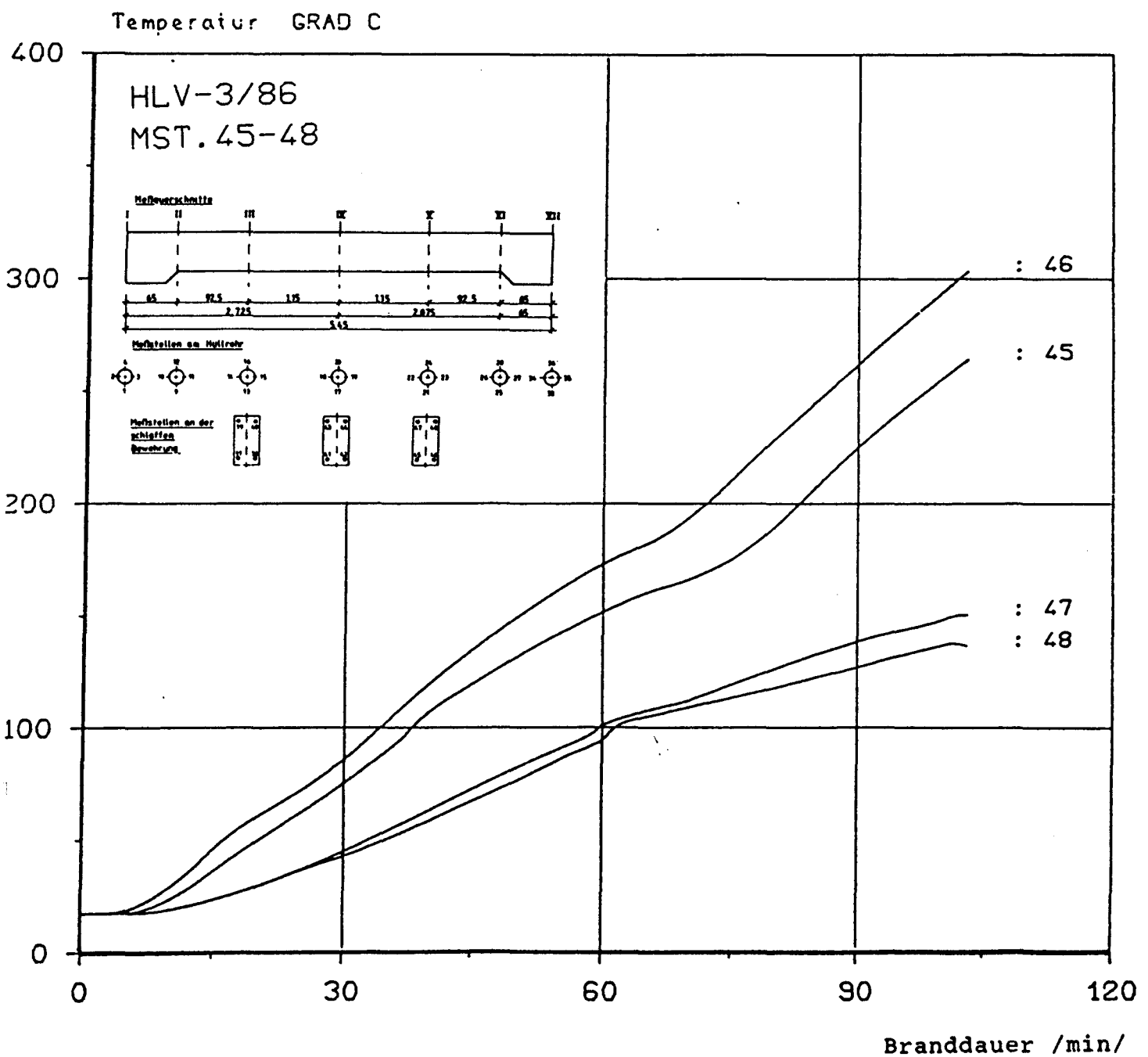
Anlage 13

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



Anlage 14

Temperaturen der schlaffen Bewehrung



Anlage 15

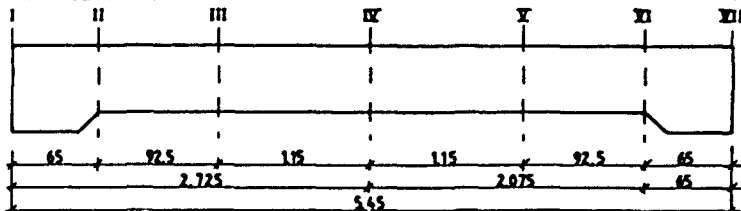
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

Temperatur GRAD C

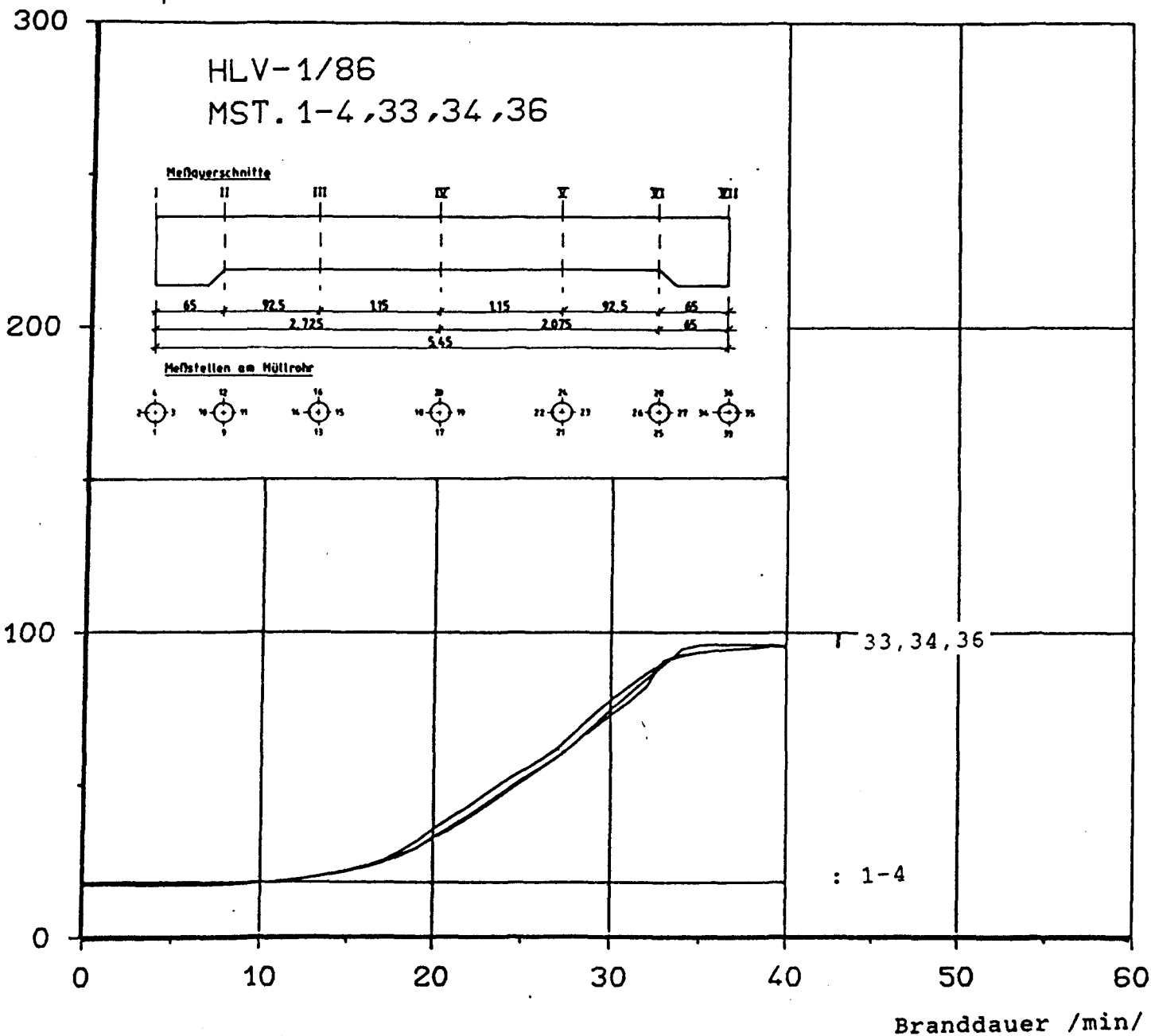
HLV-1/86

MST. 1-4, 33, 34, 36

Meßverschnitte

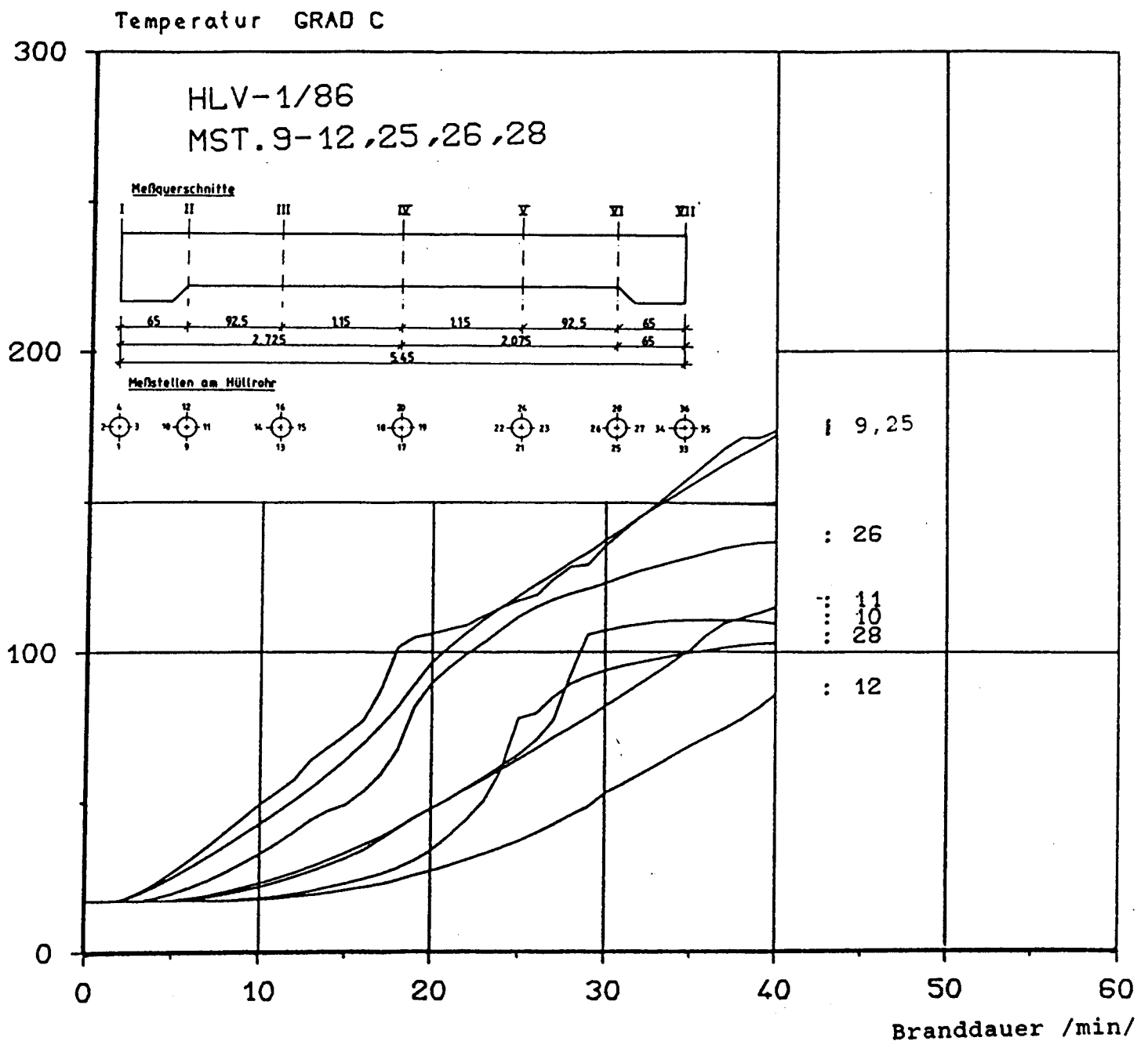


Meßstellen am Hüllrohr



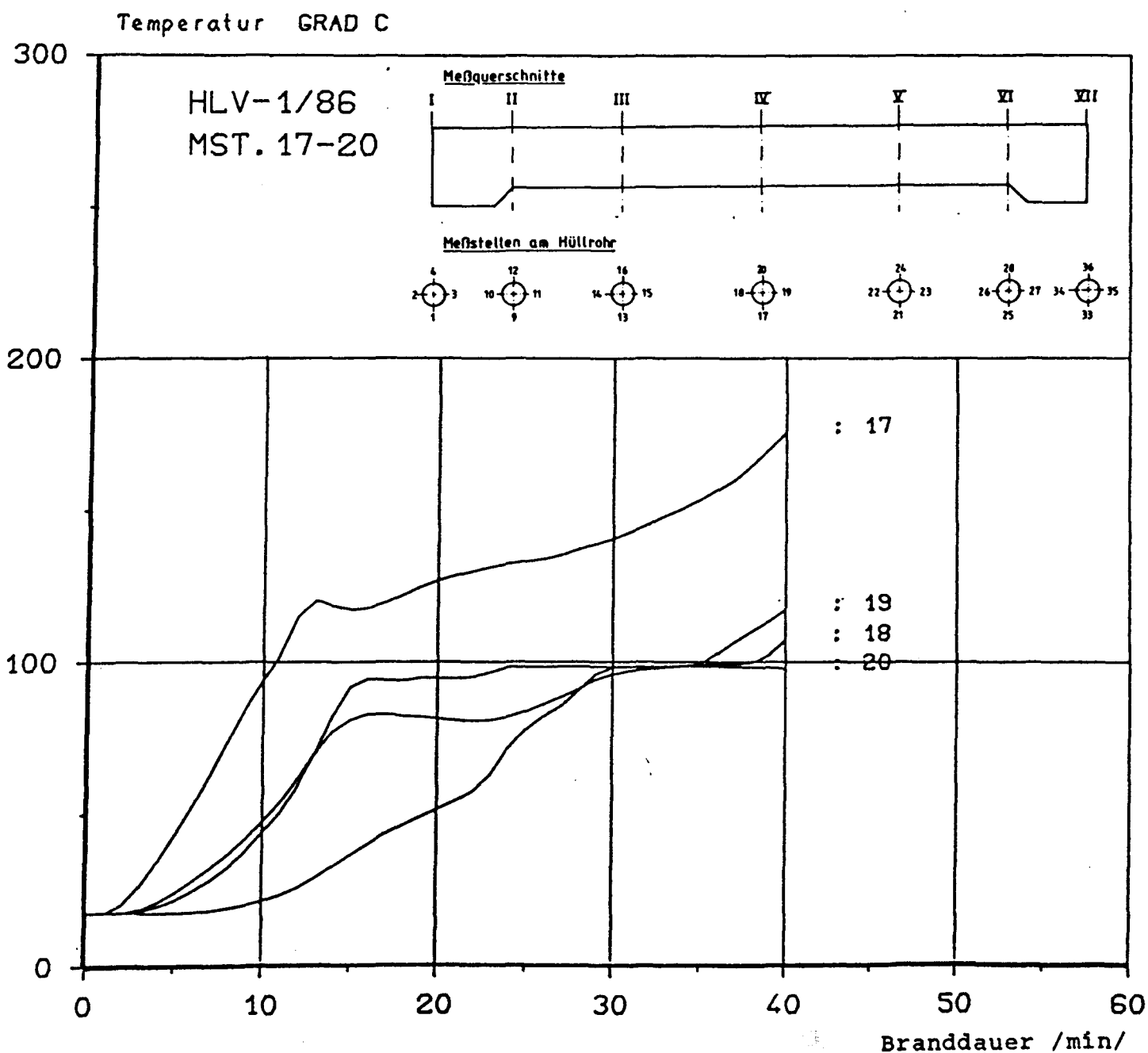
Anlage 16

Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements



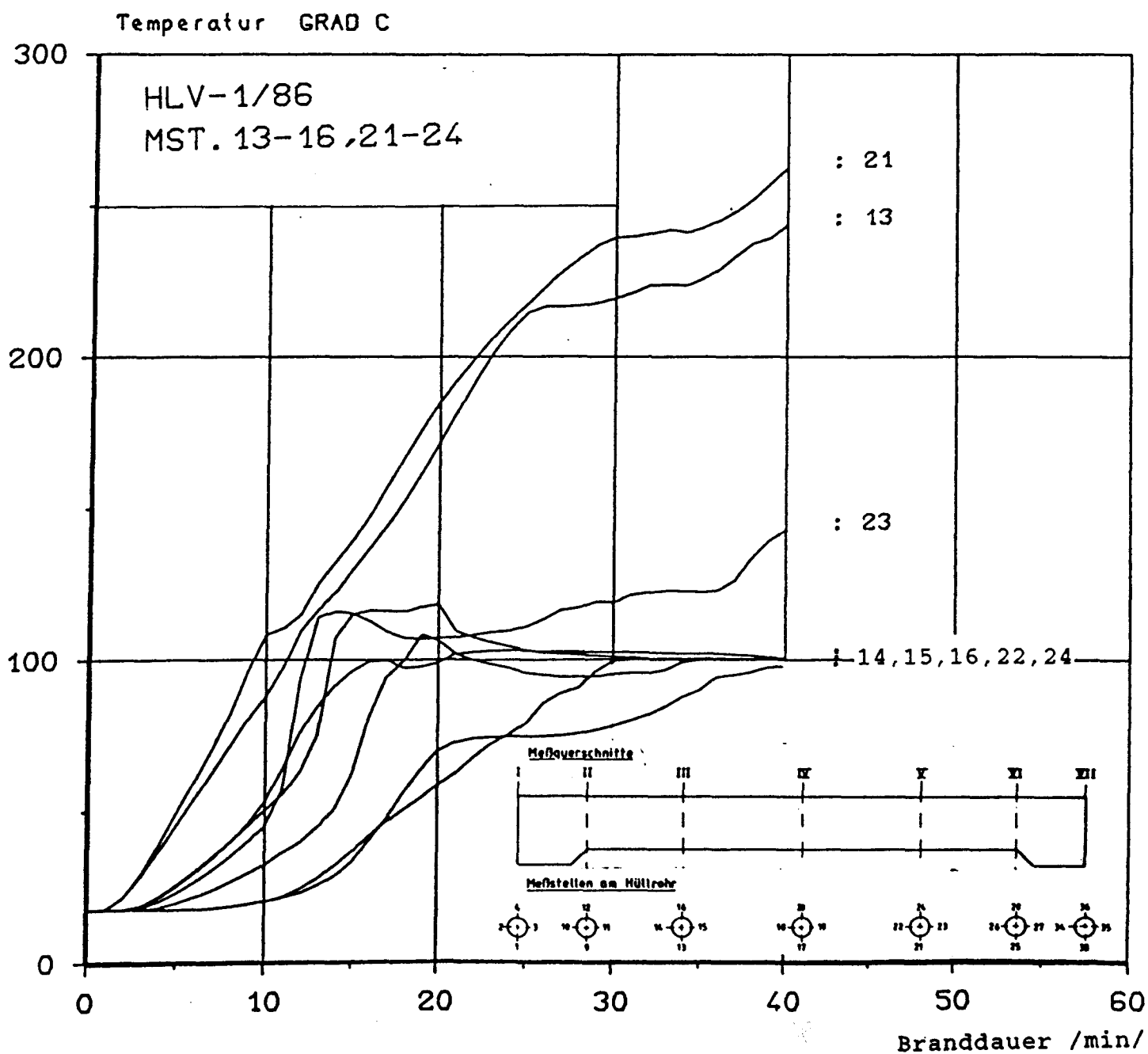
Anlage 17

Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements



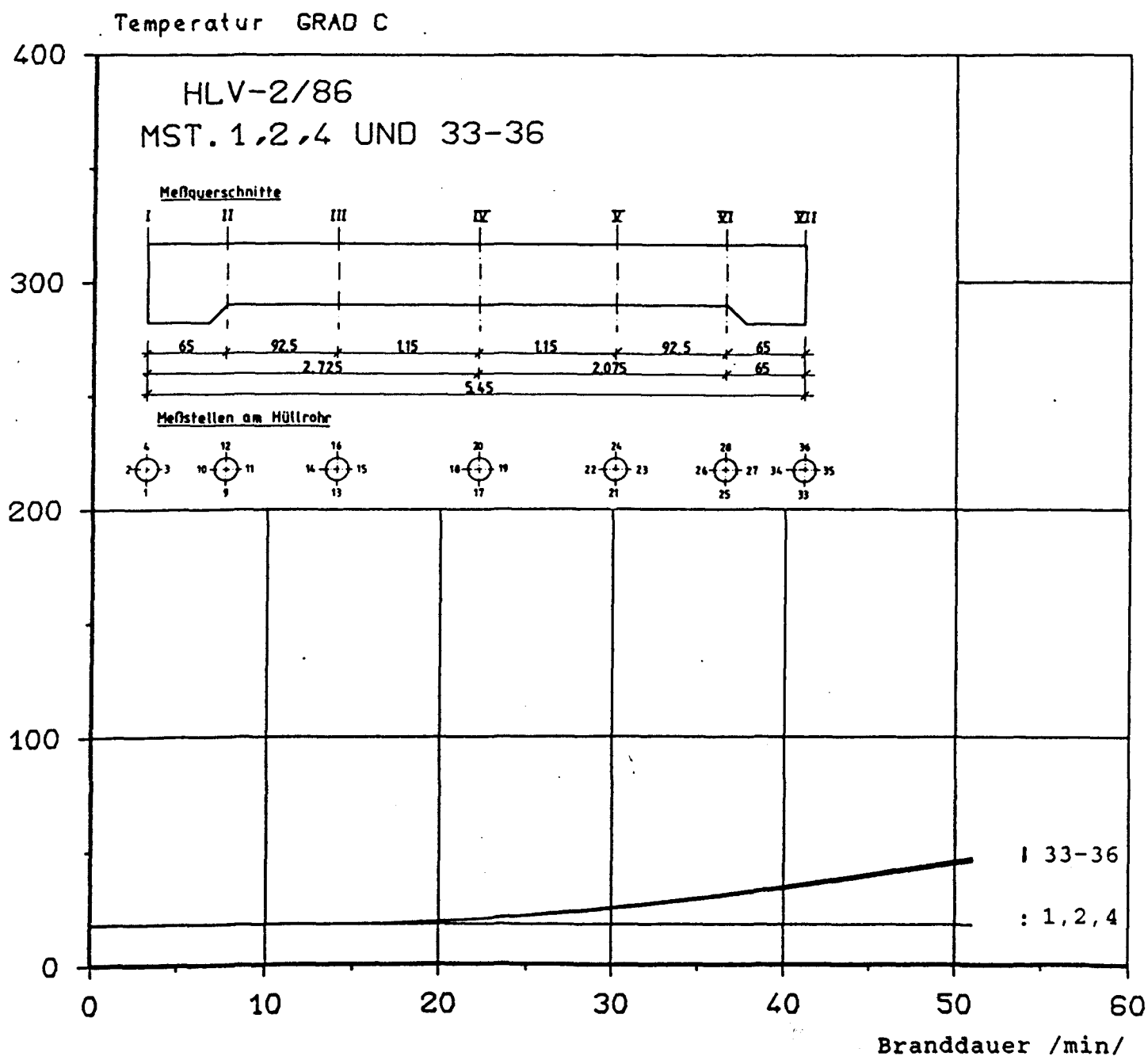
Anlage 18

Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

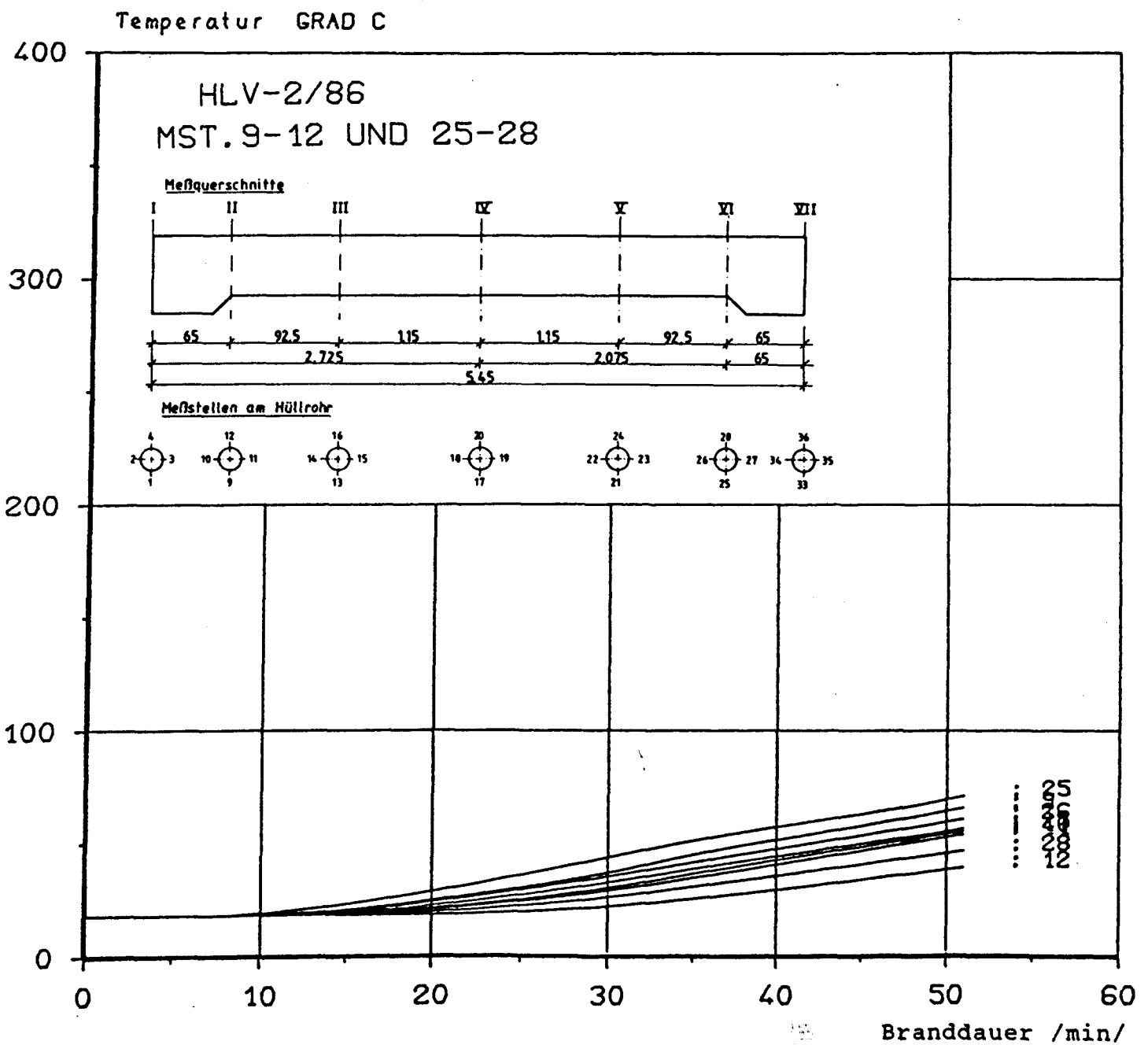


Anlage 19

Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

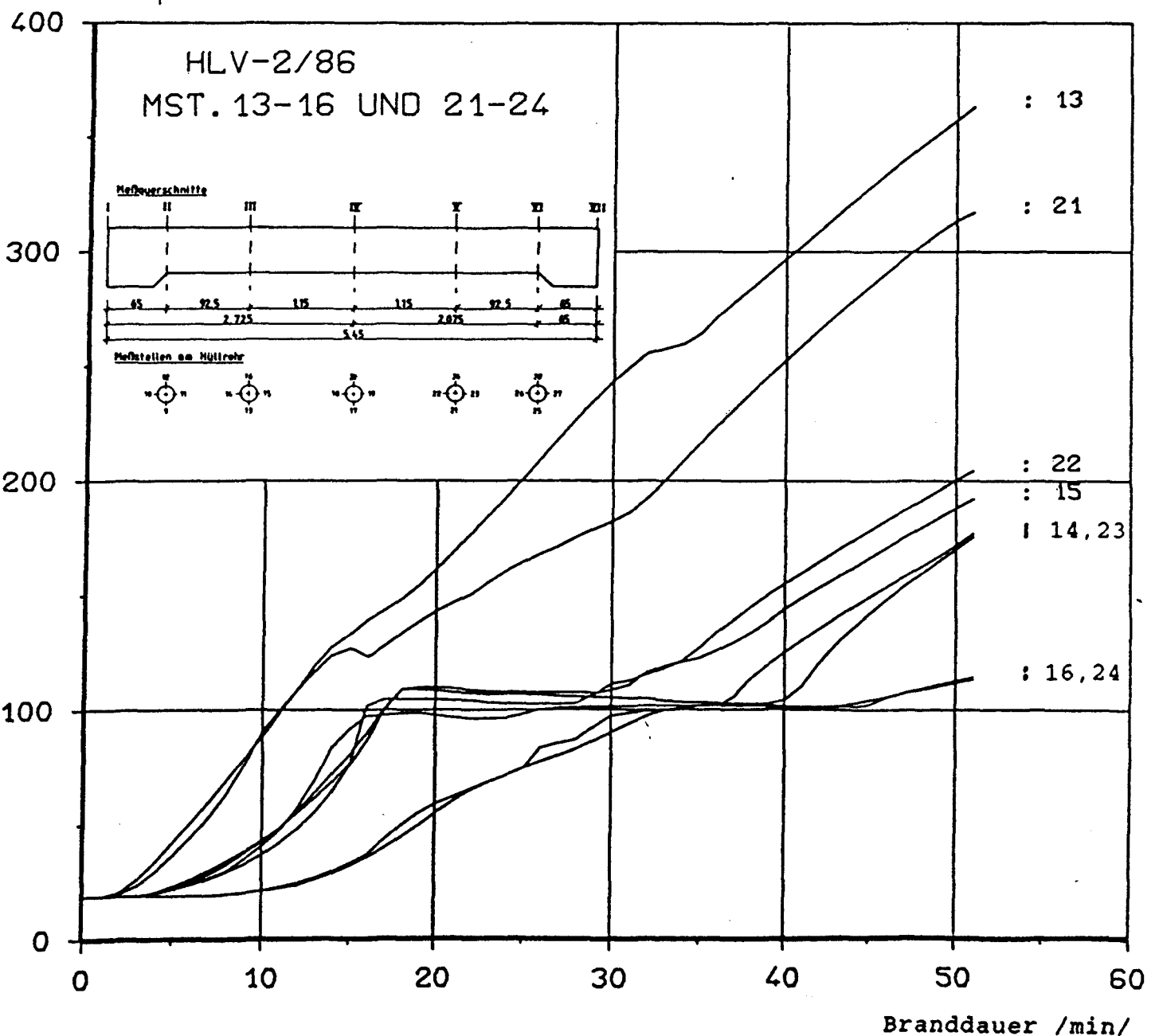


Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements



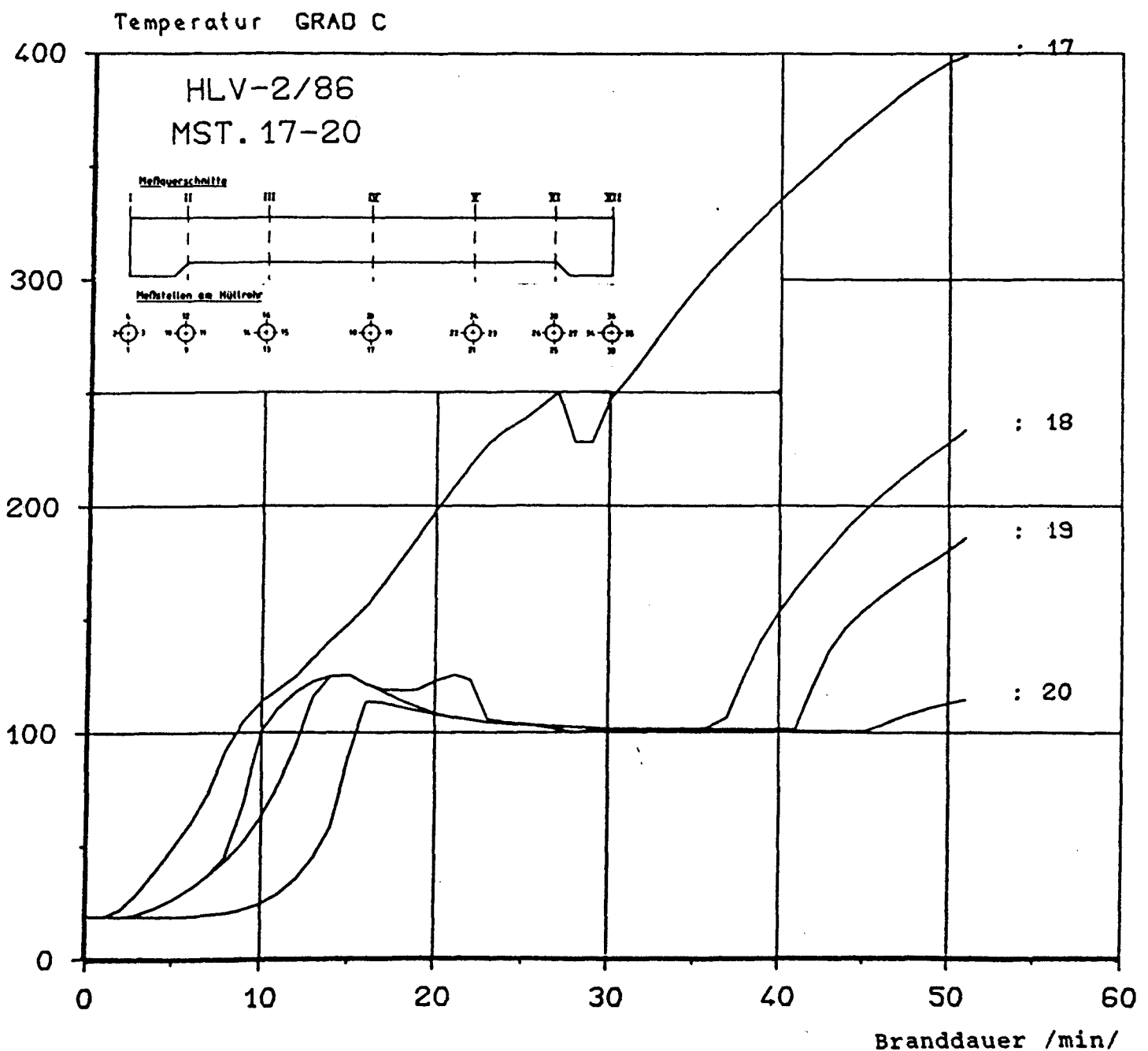
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

Temperatur GRAD C



Anlage 22

Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements



Anlage 23

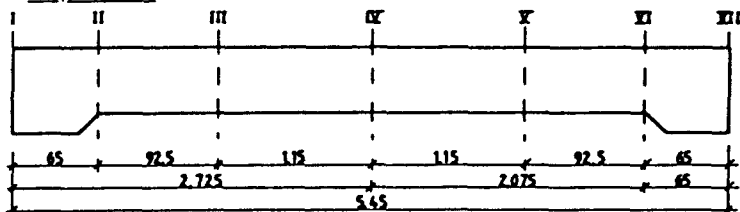
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

Temperatur GRAD C

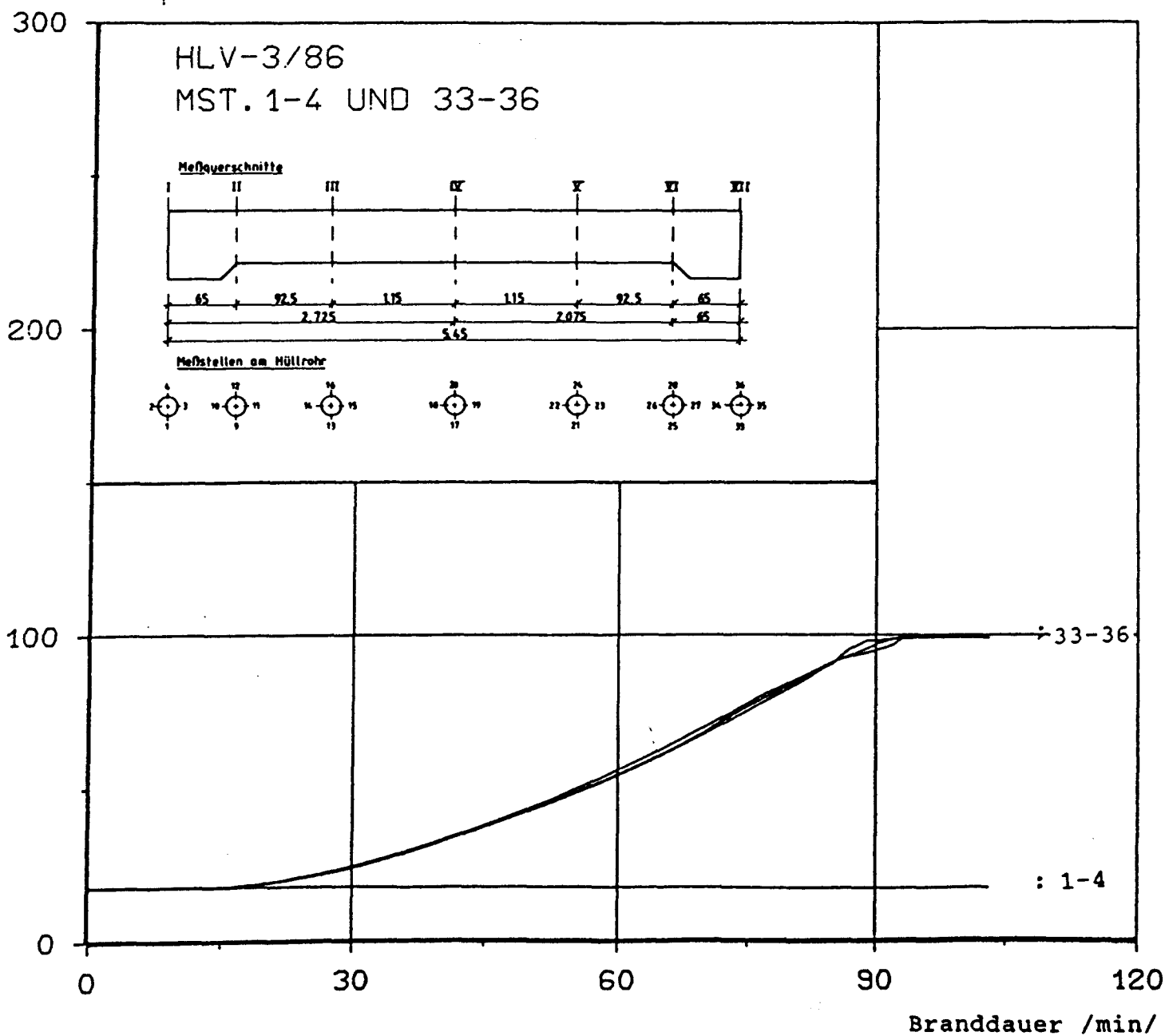
HLV-3/86

MST. 1-4 UND 33-36

Meßquerschnitte



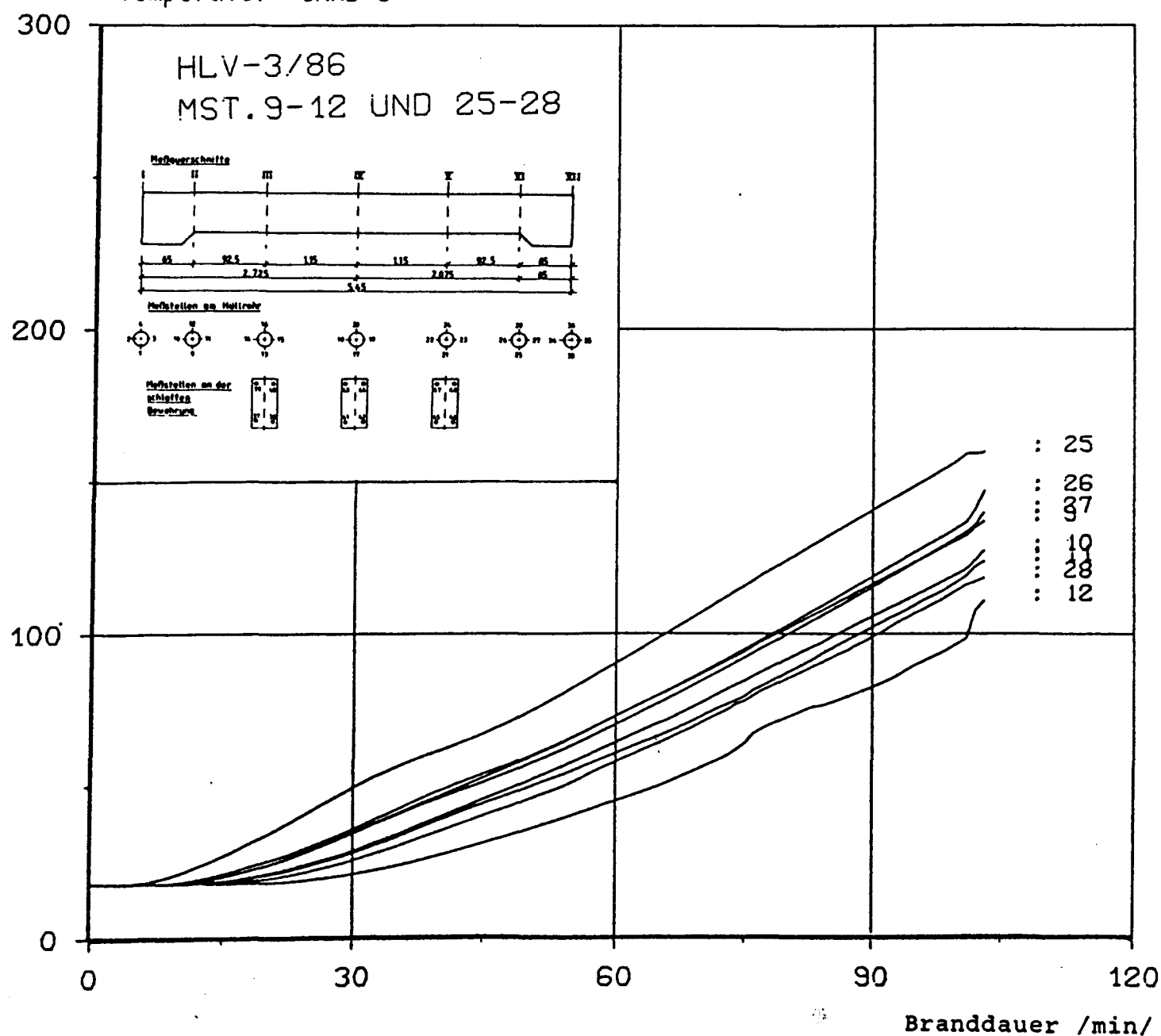
Meßstellen am Hüllrohr



Anlage 24

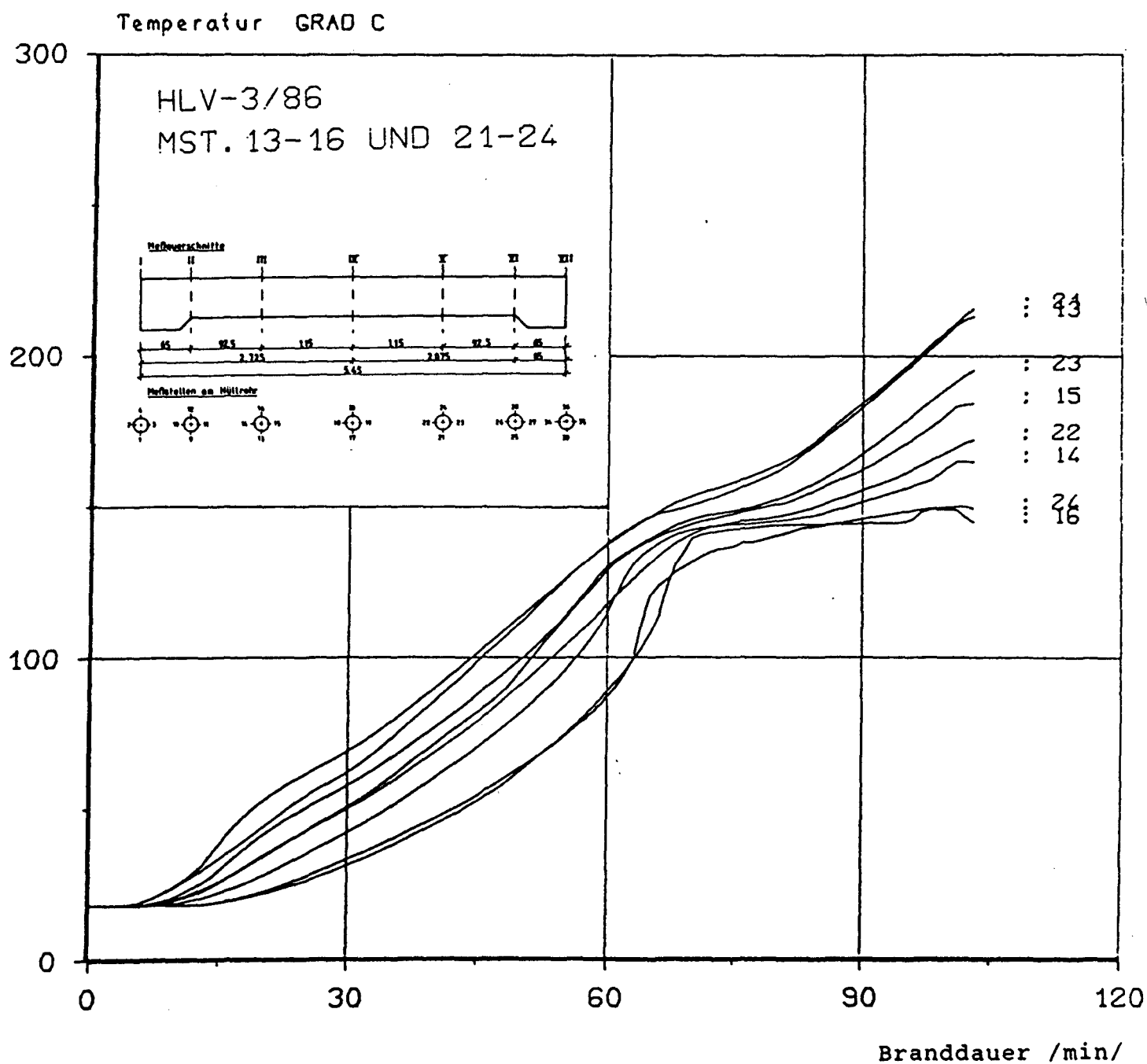
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

Temperatur GRAD C



Anlage 25

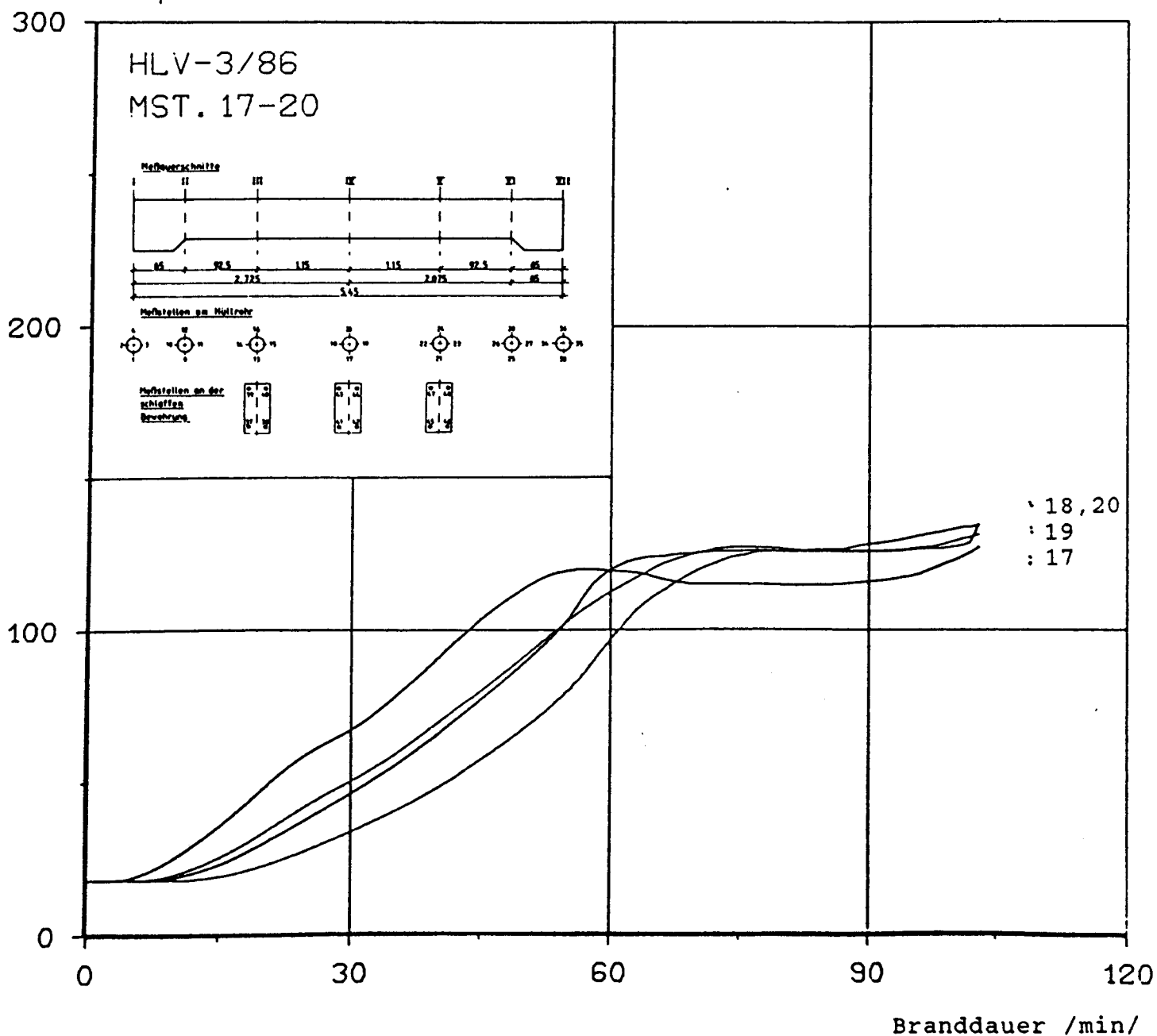
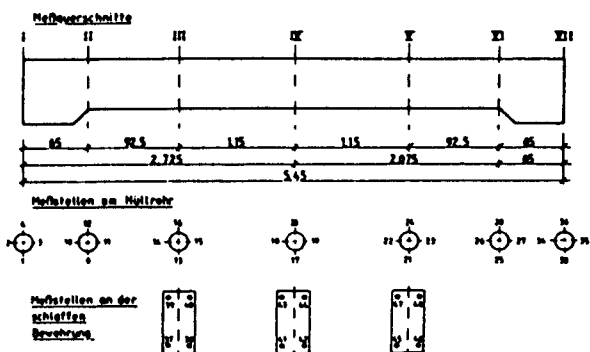
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements



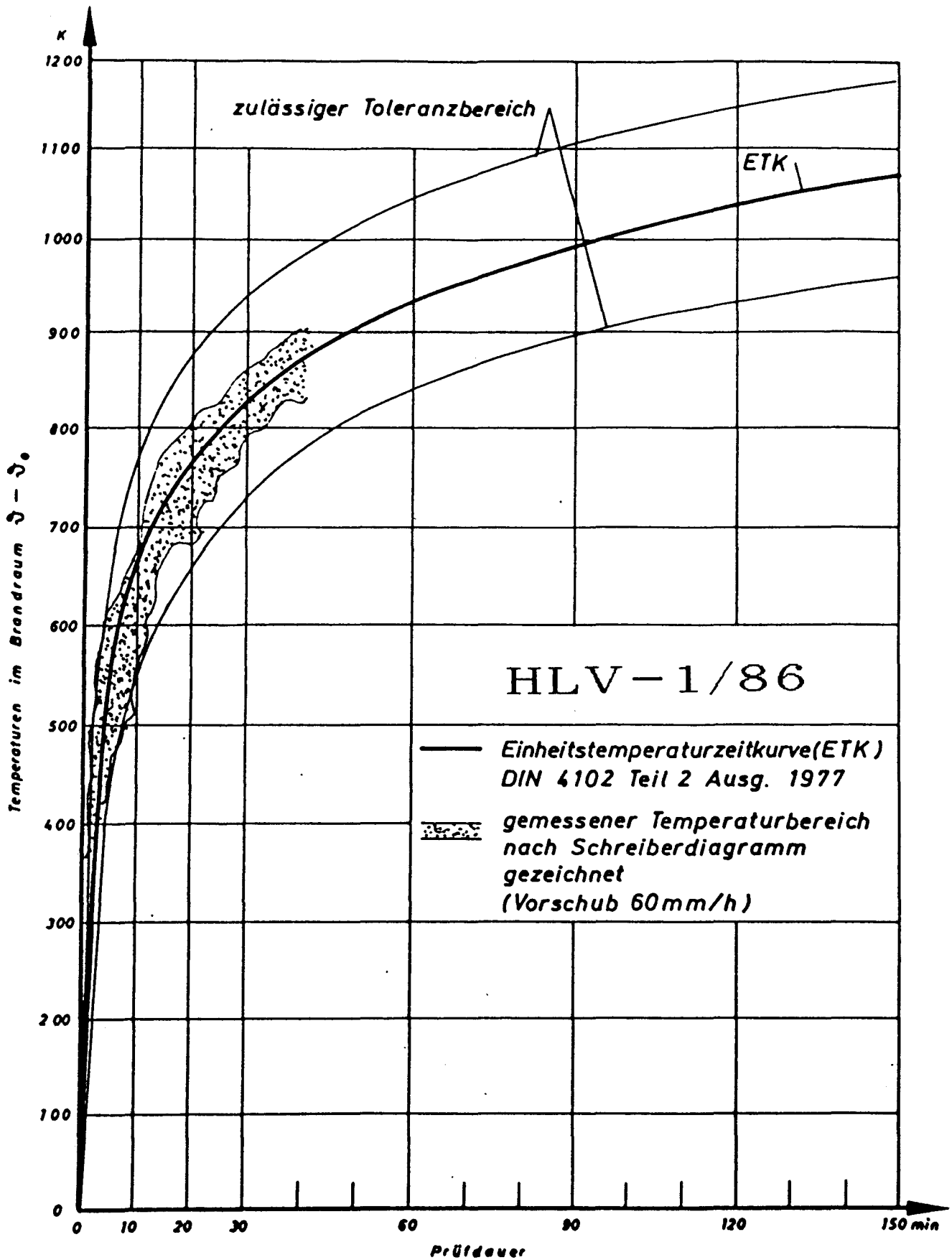
Temperaturen am Hüllrohr des HLV-Elements

Temperatur GRAD C

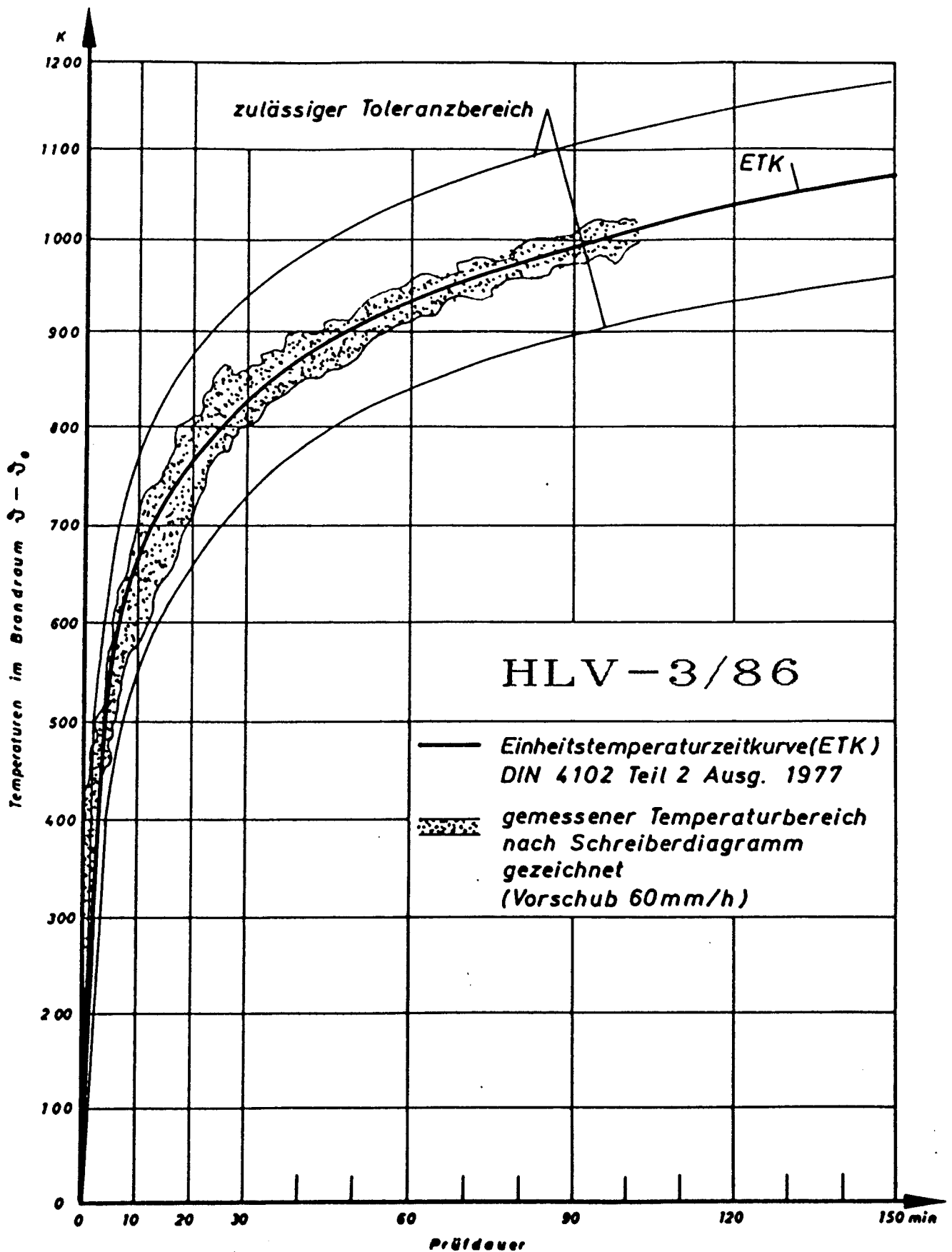
HLV-3/86
MST. 17-20



Anlage 27



Anlage 28



Anlage 29

F084-89! 107 ✓

12. MAI 1989

30-0254/001